

**METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN RÁPIDA DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE
CENTROS EDUCATIVOS RURALES**

Cristian Camilo Gutiérrez Piedrahita

Maestría en Ingeniería Civil

PhD Ricardo León Bonett Díaz

PhD Carlos Andrés Blandón Uribe

Septiembre de 2023

Universidad de Medellín

Facultad de ingenierías

Medellín, Antioquia

Nota de aceptación

Jurado

Jurado

Quiero dedicar esta tesis a mamá y papá, que siempre creyeron en mí, incluso cuando yo mismo dudaba de mis capacidades. Gracias por ser mi inspiración y por enseñarme el valor del trabajo duro y la perseverancia. Los amo con todo mi ser.

AGRADECIMIENTOS

A mi alma mater, la Universidad de Medellín, por valorar mis capacidades y permitirme continuar con mis estudios.

A mis directores de tesis, especialmente al profesor Ricardo, que siempre estuvo ahí para dirigir mi camino en esta travesía con consejos llenos de sabiduría y amabilidad, a quien agradezco no solo su aporte en mi formación sino también su aporte en mi desarrollo como persona.

A todos los autores que permitieron el planteamiento de este trabajo y a las personas que directa o indirectamente apoyaron mi proceso de formación.

CONTENIDO

RESUMEN	14
ABSTRACT	16
PALABRAS CLAVE	17
KEYWORDS	17
1. INTRODUCCIÓN	18
2. FORMULARIOS PARA EL LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN - INSPECCIÓN VISUAL RÁPIDA	23
2.1. PROPUESTAS DE OTROS AUTORES	23
2.2. PROPUESTA DEL PRESENTE ESTUDIO	31
3. CASO DE ESTUDIO – MUNICIPIO DE JERICÓ, ANTIOQUIA	40
3.1. DESCRIPCIÓN DE LOS CENTROS EDUCATIVOS RURALES	40
3.2. INSPECCIÓN VISUAL Y DESCRIPCIÓN DE LOS DAÑOS EN LAS ESTRUCTURAS	46
3.2.1. Estado de los elementos estructurales y no estructurales	46
3.2.2. Estado de las cubiertas	48
4. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO FUERA DEL PLANO DE ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA	51
4.1. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA	55
4.2. APLICACIÓN Y ADAPTACIÓN DE LA METODOLOGÍA	65
4.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO ADAPTADO	72
4.4. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA EL CASO DE ESTUDIO, JERICÓ	79
5. CASOS DE ESTUDIO: EVALUACIÓN CON BASE EN LA OPINIÓN DE EXPERTOS	91
5.1. CER MONSEÑOR AUGUSTO TRUJILLO ARANGO	91
5.2. CER ÁLVARO ARDULIO NARANJO	92
5.3. CER ESTRELLA VIEJA	96
5.4. CER AVELINO MARÍN B.	98
5.5. CER SANTIAGO SANTA MARÍA	100
5.6. CER LA PRADERA	101
5.7. CER ESCUELA NUEVA LA LEONA	104

5.8.	CER LA CASCADA NORMAL_____	104
6.	METODOLOGÍA CUALITATIVA PARA EVALUAR LA VULNERABILIDAD SÍSMICA. __	107
6.1.	PARÁMETROS PROPUESTOS _____	108
6.2.	FACTOR DE IMPORTANCIA O PONDERACIÓN DE LOS PARÁMETROS PROPUESTOS (AHP) _____	110
6.3.	DESCRIPCIÓN DE PARÁMETROS PROPUESTOS _____	116
6.3.1.	Ubicación del módulo _____	117
6.3.2.	Tipo de mampostería _____	117
6.3.3.	Conexión entre muros _____	119
6.3.4.	Estado de muros _____	120
6.3.5.	Características del muro _____	121
6.3.6.	Material de la cubierta _____	122
6.3.7.	Configuración de la cubierta_____	123
6.3.8.	Conexión de la cubierta con estructura _____	125
6.3.9.	Estado de la cubierta _____	126
6.3.10.	Manejo de aguas de cubierta _____	127
6.4.	EVALUACIÓN CON MODELO DE PRIORIZACIÓN_____	128
7.	APLICACIÓN DE MODELO DE PRIORIZACIÓN DE INTERVENCIONES _____	130
7.1.	EVALUACIÓN CON PROPUESTA DE ESTE ESTUDIO Y COMPARACIÓN _____	130
8.	CONCLUSIONES_____	132
9.	REFERENCIAS _____	139
10.	ANEXO 1 – PANTALLAS DE FORMULARIO MAGNÉTICO DE APLICATIVO MÓVIL	145
11.	ANEXO 2 – CARACTERIZACIÓN DE MUROS SIN VACÍOS “PIERS” _____	148

FIGURAS

Figura 1. Intensidad sísmica esperada e Intensidad máxima observada de izquierda a derecha.	19
Figura 2. Zonas de amenaza sísmica NSR-10	19
Figura 3. Formulario propuesto por Ningthoujam & Nanda (2018) (FEMA 154 modificado)	24
Figura 4. Formulario propuesto por Didier et al. (2017)	26
Figura 5. Formulario INSPIRE diligenciado para el estudio, Gentile et al. (2019)	27
Figura 6. Formulario FEMA 154 Lizundia et al., (2014)	29
Figura 7. Formulario implementado por Meneses-Loja & Aguilar, (2004)	31
Figura 8. Módulo 1, Formulario propuesto, Fuente: Elaboración propia	32
Figura 9. Módulo 2, Formulario propuesto, Fuente: Elaboración propia	33
Figura 10. Módulo 3, Formulario propuesto, Fuente: Elaboración propia	34
Figura 11. Portada formulario magnético.	35
Figura 12. Ejemplo ayudas gráficas de formulario	36
Figura 13. Cantidad (a) y forma (b) de módulos estructurales de los CERs visitados	42
Figura 14. Cimentaciones identificadas en los módulos de los CERs visitados	43
Figura 15. Sistemas estructurales identificados en los módulos de los CERs visitados	43
Figura 16. Tejados identificados en los módulos de los CERs visitados	44
Figura 17. Distribución de frecuencia de la altura de muros de los CERs visitados	44
Figura 18. Distribución de frecuencia del área de los CERs visitados	45
Figura 19. Distribución de la densidad de muros de los CERs visitados	45
Figura 20. Daños en la estructura del CER Álvaro Ardulio Naranjo (ID 2)	47
Figura 21. Daños en la estructura del CER Guacamayal (ID 12)	47
Figura 22. Estado de cubierta del CER Álvaro Ardulio Naranjo (ID 2)	48
Figura 23. Estado de cubierta del CER Estrella Vieja (ID 4)	49
Figura 24. Estado de cubierta del CER Avelino Marín B (ID 7)	49
Figura 25. Estado de la cubierta del CER Palenque (ID 10)	50
Figura 26. Tipos de falla fuera del plano en muros de mampostería no reforzada.	51
Figura 27. Apariencia de falla fuera del plano. Fuente: Giordano et al. (2020)	53
Figura 28. Zonas de la curva de capacidad del muro	54
Figura 29. Comparación de metodología propuesta por Giordano et al. (2020).	54
Figura 30. Hipótesis de condiciones de frontera de muros.	55
Figura 31. Condiciones de muro de frontera encontradas en campo	56
Figura 32. Hipótesis mecánicas del modelo.	58

Figura 33. Diagrama de flujo del método propuesto por Giordano et al. (2020)	59
Figura 34. Esquema típico estados de daño en curva de capacidad del muro	62
Figura 35. Espectro de demanda reducido y estados de daño. Fuente: Giordano et al. (2020)	64
Figura 36. Solución para modelado de vacíos en muros propuesta por Giordano et al. (2020).	65
Figura 37. Escuela y muro seleccionado para aplicar la metodología.	66
Figura 38. Curva de capacidad del muro seleccionado.	69
Figura 39. Diagrama momento-curvatura del muro seleccionado.	70
Figura 40. Espectro de demanda propuesto por Giordano et al., (2020) adaptado	70
Figura 41. Intercepciones entre capacidad del muro y Espectro de demanda para el muro estudiado.	71
Figura 42. Afectaciones eventos sísmicos de 1961 y de 1979	75
Figura 43. Valores de PGA para cada estado de daño según altura de muro Vs. sismos históricos de Jericó	76
Figura 44. Valores de PGA para cada estado de daño según espesor de muro Vs. sismos históricos de Jericó	77
Figura 45. Valores de PGA para cada estado de daño según carga de muro Vs. sismos históricos de Jericó	78
Figura 46. Fachada del CER Monseñor Augusto Trujillo Arango	80
Figura 47. Esquema CER Monseñor Augusto Trujillo Arango (medidas en metros)	81
Figura 48. Distribución de Desplazamientos según el estado de daño, muros sin vacíos	82
Figura 49. Distribución de Derivas según el estado de daño, muros sin vacíos	83
Figura 50. Distribución de Fuerzas según el estado de daño, muros sin vacíos	84
Figura 51. Distribución de Fuerzas normalizadas según el estado de daño, muros sin vacíos	85
Figura 52. Distribución de PGA según el estado de daño, muros sin vacíos	86
Figura 53. PGA vs Altura de muro para los muros sin vacíos	87
Figura 54. PGA vs ALR para los muros sin vacíos	88
Figura 55. PGA vs Hw/t para los muros sin vacíos	89
Figura 56. Frecuencia de PGA para muros con espesor de 12 cm	90
Figura 57. Frecuencia de PGA para muros con espesor de 15 cm	90
Figura 58. CER Monseñor Augusto Trujillo Arango	92
Figura 59. CER Álvaro Ardulio Naranjo	93
Figura 60. Deslizamiento en CER Álvaro Ardulio Naranjo	93
Figura 61. Apoyo de cubierta y afectaciones de esta, CER Álvaro Ardulio Naranjo	94
Figura 62. Afectaciones en módulo de mampostería simple, CER Álvaro Ardulio Naranjo	94

Figura 63. Costado interno. CER Álvaro Ardulio Naranjo _____	95
Figura 64. Cubierta de comedor y módulo de aulas. CER Estrella Vieja _____	96
Figura 65. Segundo módulo y espacio para el "vigilante". CER Estrella Vieja _____	97
Figura 66. CER Estrella Vieja _____	98
Figura 67. CER Avelino Marín B. _____	99
Figura 68. Módulo destinado a aulas. CER Avelino Marín B. _____	99
Figura 69. Cubierta de comedor. CER Avelino Marín B. _____	100
Figura 70. CER Santiago Santa María _____	101
Figura 71. CER La Pradera _____	102
Figura 72. Interior de aula. CER La Pradera _____	102
Figura 73. Zona posterior. CER La Pradera _____	103
Figura 74. CER Nueva La Leona _____	104
Figura 75. CER La Cascada Normal _____	105
Figura 76. Apoyo de cubierta. CER La Cascada Normal _____	105
Figura 77. Resultado del AHP _____	116
Figura 78. Parámetro de ubicación del módulo. Imagen adaptada de Flaticon.com _____	117
Figura 79. Parámetro de tipo de mampostería. Imagen de elaboración propia _____	118
Figura 80. Parámetro de conexión entre muros. Imagen de elaboración propia _____	119
Figura 81. Parámetro de material de cubierta. Imagen de elaboración propia _____	123
Figura 82. Amarre de voladizos significativos. Parámetro Configuración de la cubierta. Imagen de elaboración propia _____	125
Figura 83. Amarre estructura de la cubierta. Parámetro Configuración de la cubierta. Imagen de elaboración propia _____	125
Figura 84. Parámetro de Conexión de la cubierta con la estructura. Imagen de elaboración propia _____	126
Figura 85. Parámetro de Manejo de aguas de cubierta. Imagen de elaboración propia _____	128

TABLAS

Tabla 1. Eventos sísmicos registrados por subregión (periodo 1869 - 2016).	18
Tabla 2. Características principales generales de los CERs	41
Tabla 3. Variables de entrada de modelo. Fuente: Giordano et al. (2020)	58
Tabla 4. Estados de daño del muro. Fuente: Giordano et al. (2020)	62
Tabla 5. Valores de entrada según promedio en campo. Fuente: Propia	68
Tabla 6. Resultado de cálculo con valores promedio de muro encontrados en campo	71
Tabla 7. Valores de entrada para hallar umbrales de características del muro	72
Tabla 8. PGA para cada estado de daño según valores de entrada para hallar umbrales	73
Tabla 9. Eventos sísmicos históricos de Jericó	75
Tabla 10. Muros con vacíos y sin vacíos, CERs Jericó	79
Tabla 11. Muros sin vacíos, caracterización CER Monseñor Augusto Trujillo Arango	80
Tabla 12. Caracterización estadística de los Desplazamientos para cada DS, muros sin vacíos	82
Tabla 13. Caracterización estadística de las Derivas para cada DS, muros sin vacíos	83
Tabla 14. Caracterización estadística de las Fuerzas para cada DS, muros sin vacíos	84
Tabla 15. Caracterización estadística de las Fuerzas normalizadas para cada DS, muros sin vacíos	85
Tabla 16. Caracterización estadística de los PGA para cada DS, muros sin vacíos	86
Tabla 17. Muros sin vacíos, PGA en función de espesor	90
Tabla 18. Parámetros y respuestas para evaluar priorización de intervención en CERs	109
Tabla 19. Pesos dinámicos de parámetros propuestos	110
Tabla 20. Escala de Saaty. (Saaty, 1987)	111
Tabla 21. Matriz de comparación o de pesos. Escenario 2	113
Tabla 22. Matriz normalizada. Escenario 2	113
Tabla 23. Matriz promedio. Escenario 2	114
Tabla 24. Cálculo de índices. Escenario 2	114
Tabla 25. Iteración 1. Escenario 2	115
Tabla 26. Iteración 2. Escenario 2	115
Tabla 27. Propuesta para descripción de respuestas del parámetro de estado de muros	120
Tabla 28. Respuestas para el parámetro Características del muro	121
Tabla 29. Condiciones para respuesta del parámetro Características del muro	122
Tabla 30. Respuestas para el parámetro Configuración de la cubierta	124
Tabla 31. Condiciones para respuesta del parámetro Configuración de la cubierta	124

Tabla 32. Propuesta para descripción de respuestas del parámetro de estado de cubierta__	127
Tabla 33. Nivel de vulnerabilidad, clasificación. Sacado de Benedetti & Petrini, (1982) _____	128
Tabla 34. Nivel de vulnerabilidad, clasificación. Propuesta del presente estudio _____	129
Tabla 35. Evaluación a 12 CERs de Antioquia _____	129
Tabla 36. Comparación de evaluación de vulnerabilidad empíricamente, con metodología propuesta en este estudio y con la propuesta por <i>Benedetti & Petrini, (1982)</i> _____	130

ECUACIONES

Ecuación 1.	59
Ecuación 2.	59
Ecuación 3.	60
Ecuación 4.	60
Ecuación 5.	60
Ecuación 6.	60
Ecuación 7.	60
Ecuación 8.	61
Ecuación 9.	61
Ecuación 10.	61
Ecuación 11.	63
Ecuación 12.	63
Ecuación 13.	64
Ecuación 14.	76
Ecuación 15.	88

RESUMEN

El rezago económico que se vive en países en vías de desarrollo se ve marcadamente presente en sus zonas rurales. Una de las múltiples dimensiones afectadas por este comportamiento se ve reflejada en la calidad del diseño y construcción de las estructuras, en general las mismas no cuentan con las capacidades mínimas para salvaguardar la vida de las personas e incluso edificaciones con niveles altos de importancia, tales como los Centros Educativos Rurales (CERs), presentan características similares. La vulnerabilidad implícita asociada a eventos naturales como los sismos se ve particularmente agravada ante esta situación, pues de los centros educativos depende en gran medida el futuro de un país.

Teniendo en cuenta lo anterior, en el presente estudio se desarrolló una metodología que permite evaluar la vulnerabilidad sísmica de Centros Educativos Rurales a partir del cálculo de un índice global basado en información que puede ser recopilada a través de un aplicativo móvil. La metodología puede ser aplicada de forma masiva a todos los Centros Educativos de una región o de un país para generar un primer diagnóstico que permita establecer esquemas de priorización e intervención para la reducción incremental del riesgo sísmico.

Inicialmente se desarrolló un formulario para el levantamiento de información in situ que fue posteriormente empleado en campo en el municipio de Jericó, Antioquia, Colombia. Se eligió este municipio como prueba piloto para validar el formulario debido a que cuenta con un historial significativo de eventos sísmicos, permitiendo calibrar el instrumento de recolección de información en una zona que se ha visto afectada en el pasado por estos eventos. El proceso de validación se realizó en ocho diferentes CERs para la realización de ajustes y posterior generación de una versión digital del formulario que fue implementada en un aplicativo móvil o App.

A partir de la información recopilada por medio de la App se identificaron diversas características particulares de las edificaciones de estas zonas, entre ellas el reconocimiento de la mampostería simple como la tipología estructural más utilizada, caracterizada por la ausencia

de elementos estructurales verticales y horizontales que aporten en la resistencia de la edificación ante un evento sísmico.

A partir de esta identificación se investigó el mecanismo de falla más común en las edificaciones de mampostería simple, el cual corresponde a la falla fuera del plano. Con base en esta información se adaptó la metodología propuesta por Giordano et al., (2020) que estudió esta tipología de falla mediante la implementación del método de superposición de la capacidad del muro más vulnerable de la estructura con la demanda sísmica del sitio expresada en términos de un espectro de diseño. Para determinar la capacidad del muro más vulnerable se utiliza un modelo simplificado de no linealidad concentrada en la base por medio del uso de una rótula plástica y a partir del diagrama momento-curvatura se obtiene la capacidad del muro. Este modelo propuesto por Giordano et al., (2020), se utilizó para identificar los principales parámetros que influyen en el comportamiento fuera del plano de la mampostería y que, por lo tanto, influyen significativamente sobre la vulnerabilidad de la estructura ante la ausencia de daños en la misma.

Una vez estudiada la composición de la estructura y la importancia o el peso de los diferentes parámetros sobre su vulnerabilidad sísmica, se definió un total de diez parámetros a partir de los cuales se calculó el índice de vulnerabilidad. La combinación de estos parámetros se hizo a través de la definición de pesos o factores de importancia que fueron definidos a partir del juicio de expertos utilizando el Proceso de Análisis Jerárquico propuesto por Saaty, (1987). Finalmente se comparó lo propuesto en este estudio con el resultado de realizar estas mismas evaluaciones bajo el enfoque de otros autores y bajo el juicio de expertos que permitieron conocer la validez de esta propuesta. Los resultados obtenidos, mostrados más adelante, permiten concluir que esta metodología es útil para la toma de decisiones en cuanto a la priorización de las intervenciones que deben ser llevadas a cabo en los diferentes CERs de cara a la disminución gradual de su vulnerabilidad sísmica.

ABSTRACT

The economic lag experienced in developing countries is prominently evident in their rural areas. One of the many dimensions affected by this situation is reflected in the quality of design and construction of structures, where generally they lack the minimum capacities to safeguard people's lives. Even buildings of high importance, such as Rural Educational Centers (CERs for its acronym in Spanish), exhibit similar characteristics. The inherent vulnerability associated with seismic events is particularly aggravated by this situation, as the future of a country depends significantly on educational centers.

Taking the above into account, the present study developed a methodology that allows for the assessment of seismic vulnerability in Rural Educational Centers by calculating a global index based on information that can be collected through a mobile application. The methodology can be applied extensively to all educational centers in a region or a country to generate an initial diagnosis that enables the establishment of prioritization and intervention schemes for the incremental reduction of seismic risk.

Initially, a form was developed for on-site data collection, which was subsequently used in the municipality of Jericó, Antioquia, Colombia. This municipality was chosen as a pilot test site to validate the form because it has a significant history of seismic events, allowing for the calibration of the information collection instrument in an area that has been affected by such events in the past. The validation process was conducted in eight different Rural Educational Centers to adjust and subsequently generate a digital version of the form, which was implemented in a mobile application or app.

Based on the information collected through the app, various characteristics of the buildings in these areas were identified. One of them was the prevalence of simple masonry as the most used structural typology, characterized by the absence of vertical and horizontal structural elements that contribute to the building's resistance during a seismic event.

With this identification, the most common failure mechanism in simple masonry buildings, known as out-of-plane failure, was investigated. Based on this information, the methodology proposed by Giordano et al., (2020), which studied this type of failure by implementing the method of superimposing the capacity of the most vulnerable wall of the structure with the seismic demand of the site expressed in terms of a design spectrum, was adapted. To determine the capacity of the most vulnerable wall, a simplified model of concentrated nonlinearity at the base was used, employing a plastic hinge, and the wall's capacity was obtained from the moment-curvature diagram. This model proposed by Giordano et al., (2020) was used to identify the main parameters that influence out-of-plane behavior of masonry and, therefore, the parameters that significantly affect the vulnerability of the structure in the absence of damage.

After studying the structure's composition and the importance or weight of different parameters on its seismic vulnerability, a total of ten parameters were defined from which the vulnerability index was calculated. The combination of these parameters was done by assigning weights or importance factors, which were defined based on expert judgment using the Analytic Hierarchy Process proposed by Saaty, (1987). Finally, what was proposed in this study was compared with the results obtained from conducting the same evaluations under the approach of other authors and expert judgment, which helped determine the validity of this proposal. The results obtained, presented later, lead to the conclusion that this methodology is useful for decision-making regarding the prioritization of interventions that need to be carried out in different CERs to gradually reduce their seismic vulnerability.

PALABRAS CLAVE

Vulnerabilidad sísmica, priorización de intervenciones, Falla fuera del plano, mampostería, Escuelas rurales, Inspección visual rápida, Colombia.

KEYWORDS

Seismic vulnerability, prioritization of interventions, Out-of-plane failure, masonry, Rural schools, Rapid visual inspection, Rapid Visual Screening, RVS, Colombia.

1. INTRODUCCIÓN

El presente estudio se enfoca en el desarrollo de una metodología de evaluación rápida de la vulnerabilidad sísmica de los Centros Educativos Rurales (CERs) del departamento de Antioquia construidos en mampostería. Para este desarrollo fue seleccionado el departamento de Antioquia que cuenta con un total de 296 eventos sísmicos registrados entre 1869 y 2016 (Servicio Geológico Colombiano, 2016), repartidos en cada una de sus regiones, siendo las subregiones Oriente y Suroeste las más frecuentemente afectadas por este tipo de eventos, 69 y 67 respectivamente (ver Tabla 1).

Tabla 1. Eventos sísmicos registrados por subregión (periodo 1869 - 2016).

Fuente: (Servicio Geológico Colombiano, 2016)

SUBREGIÓN	EVENTOS SÍSMICOS
Bajo Cauca	2
Magdalena Medio	7
Nordeste	25
Norte	23
Occidente	34
Oriente	69
Suroeste	67
Urabá	23
Valle de Aburrá	46

Una representación gráfica (Figura 1) permite ubicar espacialmente las regiones con la intensidad máxima observada y esperada en Antioquia, mostrando con colores más cálidos las mayores intensidades, y evidenciando que, aunque la frecuencia de la ocurrencia de dichos eventos no sea la más significativa en estas regiones, un evento en estas zonas podría provocar mayores afectaciones por el nivel de energía que se liberaría.

El Reglamento Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes, NSR-10 (Asociación Colombiana de Ingeniería, 2010), muestra un mapa de amenaza sísmica asociado a cada región (Figura 2), en el cual se puede encontrar información similar a lo mostrado en la figura de intensidad sísmica esperada y variando un poco con respecto a la figura de la intensidad máxima observada (Figura 1) (Servicio Geológico Colombiano, 2016).

METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN RÁPIDA DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE CENTROS EDUCATIVOS RURALES

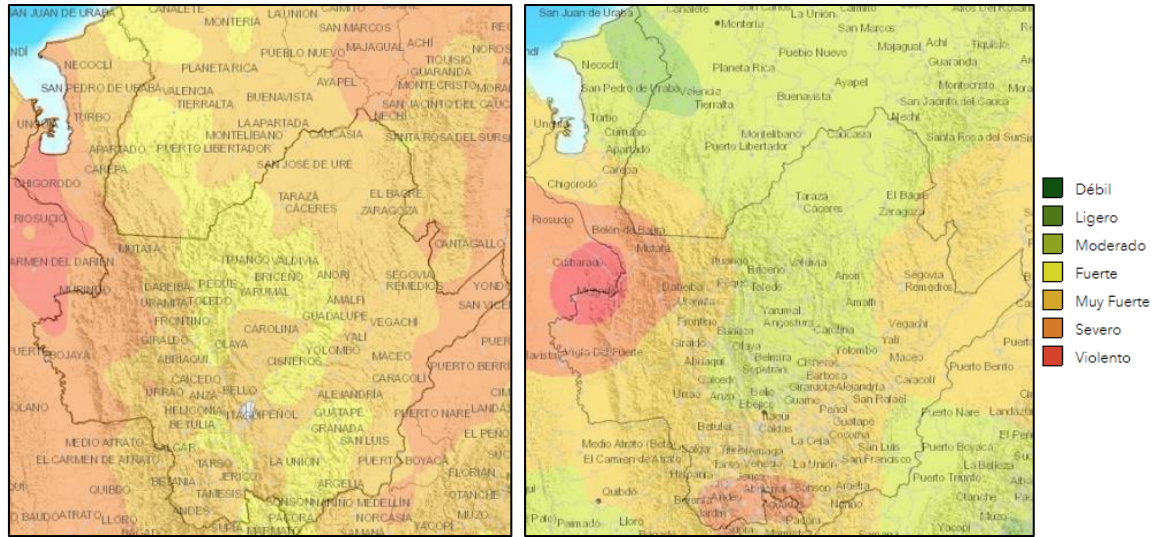


Figura 1. Intensidad sísmica esperada e Intensidad máxima observada de izquierda a derecha.

Fuente: Adaptada de (Servicio Geológico Colombiano, 2016)

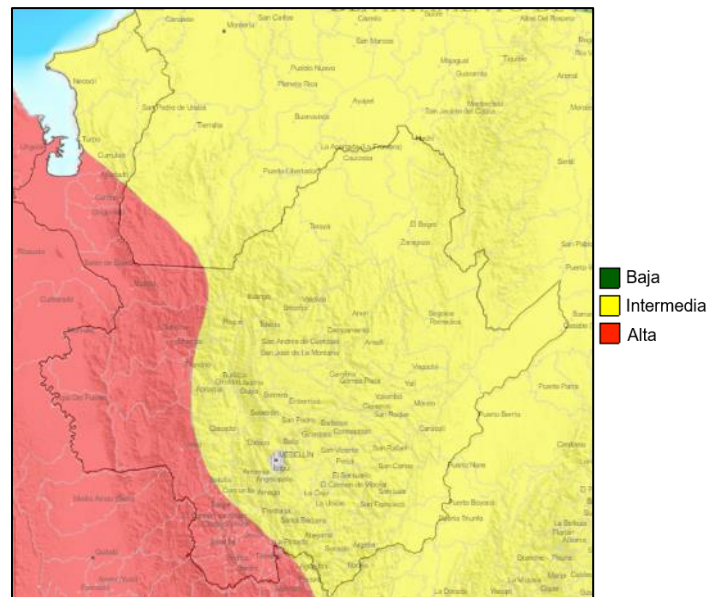


Figura 2. Zonas de amenaza sísmica NSR-10

Fuente: Asociación Colombiana de Ingeniería (2010)

Para esta región antioqueña, a lo anterior, se suman las limitaciones en cuanto a recursos y solvencia económica de las poblaciones, siendo la zona rural la más afectada, reflejando una mayor vulnerabilidad en las estructuras emplazadas en estas regiones de cara a la ocurrencia de un evento sísmico. Los recursos con los que dispone en particular cada municipio son limitados y en la mayoría de los casos los Centros Educativos Rurales no entran en la primera

línea de priorización para la realización de estudios e intervenciones que permitan disminuir el riesgo al que está expuesta esta población.

Día a día miles de jóvenes asisten a CERs con el fin de buscar un mejor futuro para sí mismos y para sus familias, sin embargo, dadas las condiciones actuales de un gran número de estos centros educativos, muchos carecen de las condiciones mínimas de seguridad frente a amenazas tales como eventos sísmicos, inundaciones, movimientos en masa o vendavales.

Según la base de datos del Desinventar (Desinventar, 2020) que compila información del DAPARD y la Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), sobre desastres que han ocurrido en Antioquia desde 1894 hasta 2020, se contabilizaron 5.257 emergencias o desastres en más de un siglo en el departamento, alrededor del 4% (288 eventos) han generado afectación en el sector educativo y 188 han generado afectaciones directas en las escuelas, siendo los eventos más críticos y dañinos, el sismo de Murindó de 1999, un deslizamiento en Santo Domingo en 2001, una avenida torrencial en Yalí en 2002, inundaciones en Doradal y Carepa en 2003, entre otros.

En el 2017, la gobernación de Antioquia reportó que el 90% de los centros educativos del departamento que se han visto afectados por fenómenos de origen natural o que se encuentran en mal estado, corresponden a escuelas o colegios rurales y que el 50% de las quejas que recibieron correspondían a un déficit en la infraestructura. Además, 1.024 de los 4.335 centros educativos del departamento se encontraban en una situación grave (El Espectador, 2017).

Debido al alto costo que presenta evaluar la vulnerabilidad de una edificación y a los reportes anteriormente mencionados, el presente estudio mostrará el desarrollo de una metodología para el cálculo cualitativo de la vulnerabilidad sísmica de los CERs, que tenga en cuenta las características de la región en cuanto a las particularidades de las estructuras como sus aspectos significativos y que a su vez permita, dadas las limitaciones económicas de estas regiones y de los mismos Centros Educativos Rurales, el acceso a esta evaluación de la vulnerabilidad sísmica a la mayor cantidad posible de CERs, para lograr priorizar aquellos que

requieran una evaluación más rigurosa que permita determinar o no la necesidad de intervenir una estructura.

Dicha metodología contará con el desarrollo de un formulario para la recolección de información in situ, posteriormente será implementado en campo, en donde se evaluará su desempeño y se propondrán mejoras que permitan la obtención de información de manera ágil y eficiente. Con base en el levantamiento de información, se adaptará una metodología para la tipología estructural más frecuente hallada en el conjunto de estudio, para, finalmente, y gracias a este respaldo, definir y desarrollar los parámetros para tener en cuenta en el cálculo de la vulnerabilidad sísmica y para la priorización en la intervención de los CERs estudiados.

El presente documento está dividido en once (11) Capítulos. El primer Capítulo consta de la introducción a este trabajo de grado. En el segundo Capítulo se comenta la utilidad de los formularios para el levantamiento de información en campo, se habla de las propuestas de otros autores y de la propuesta del presente estudio. Posteriormente, en el tercer Capítulo, se describe el caso de estudio de este trabajo de grado, Jericó, Antioquia, con lo encontrado en campo. Tras esto, en el cuarto Capítulo, se emplea la metodología propuesta por Giordano et al., (2020) para conocer los principales parámetros que afectan el tipo de falla más común de la mampostería simple (tipología típicamente encontrada en la zona de estudio), la falla fuera del plano, mediante un análisis de sensibilidad y una aplicación de la metodología a varios CERs seleccionados de la zona. En el quinto Capítulo se lleva a cabo una evaluación de la vulnerabilidad sísmica de los CERs seleccionados con base en la opinión de expertos. En el sexto Capítulo se describe la metodología cualitativa para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica propuesta en el presente trabajo de grado, en conjunto con los parámetros postulados, la importancia de estos mismos y el porqué de cada uno de ellos. En el séptimo Capítulo se lleva a cabo una aplicación de la metodología propuesta en el sexto Capítulo y se comparan los resultados de esta con la propuesta de otros autores y con la evaluación basada en la opinión de expertos vista en el quinto Capítulo. En el octavo Capítulo se pueden encontrar las conclusiones del presente trabajo de

grado y, finalmente, en el noveno, décimo y undécimo Capítulo se pueden encontrar, respectivamente, las referencias, el anexo 1 y el anexo 2.

2. FORMULARIOS PARA EL LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN - INSPECCIÓN VISUAL RÁPIDA

En la actualidad, se cuenta con una muestra amplia de formularios y aplicativos que han sido desarrollados para la inspección rápida visual de estructuras. Cada uno de ellos, adaptado a las condiciones de las zonas, tipologías estructurales y condiciones socioeconómicas de las regiones donde se encuentran emplazadas las estructuras a inspeccionar.

El formulario para la recolección de información in situ propuesto en el presente estudio con el fin de calcular la vulnerabilidad sísmica de una edificación, puede ser utilizado por personal experto y no experto (con poca capacitación). Este instrumento permite garantizar, mediante la recopilación de información clave, la obtención de datos que permitan dicha evaluación sin llegar a ser complejo para la persona que lo está diligenciando. Para tal fin se realizó una búsqueda de lo propuesto a nivel internacional por diversos autores en cuanto a formularios y variables consideradas para la evaluación de la vulnerabilidad según los modelos planteados.

2.1. PROPUESTAS DE OTROS AUTORES

Ningthoujam & Nanda (2018) plantearon un modelo de regresión estadística para determinar la relación entre una variable de salida, en su caso, el grado de daño de una edificación tras un sismo, y las variables concernientes a los atributos de la edificación que pueden aumentar la vulnerabilidad de la edificación durante el sismo. En este estudio se usó una base de datos de 396 edificaciones dañadas tras el sismo del 4 de enero de 2016 en Imphal, Manipur, India y se propuso un procedimiento de Inspección Visual Rápida (Rapid Visual Screening) para identificar la vulnerabilidad de edificaciones en un programa de reducción de riesgos en desastres mediante el uso de un formulario FEMA 154 modificado (Figura 3).

En este modelo de regresión lineal se encontraron como variables estadísticamente significativas el tipo de suelo, la calidad aparente de construcción, el mantenimiento de la edificación, la edad de la edificación, los voladizos importantes, y el número de pisos, dejando

por fuera variables como la identificación de una losa blanda, de columnas flotantes, de esquinas entrantes y de la asimetría en la ubicación en planta de las escaleras.

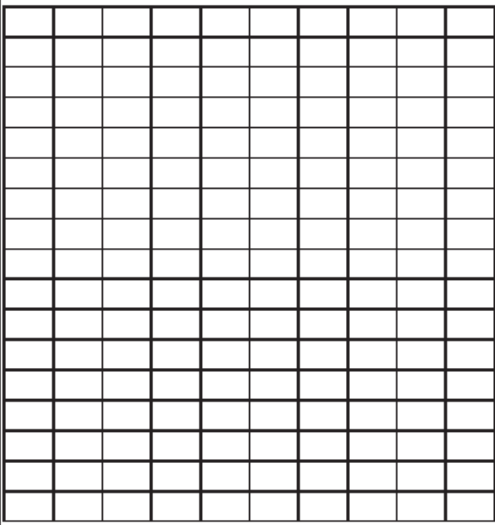
	Building Name _____ Address _____ Other Identifiers _____ GPS Co-ordinates (If available) _____ No. Stories _____ Year Built _____ Total Floor Area (sq. Ft. /sq. m) _____ Seismic zone _____ Surveyor _____ Date _____					
	PHOTOGRAPH (OR SPECIFY PHOTOGRAPH NUMBERS)					
	OCCUPANCY			SOIL TYPE		Age of the building:
	Commercial <input type="checkbox"/>	Residential <input type="checkbox"/>	Educational <input type="checkbox"/>	Occupancy number <input style="width: 20px;" type="text"/>	Type I Type II Type III Hard Medium Soft	Age of building (In years) <input style="width: 40px;" type="text"/>
	BASIC SCORE, MODIFIERS, AND FINAL SCORE, S					
		Seismic zone	Zone II	Zone III	Zone IV	Zone V
		Basic scores	1.00	1.70	2.00	2.70
	Basic score modifier	Substantial overhang	+0.41	+0.41	+0.41	+0.41
		Age of building : Increment per year	+0.02	+0.02	+0.02	+0.02
		Poor construction quality	+2.20	+2.20	+2.20	+2.20
Moderate construction quality		+1.10	+1.10	+1.10	+1.10	
Poor Maintenance condition		+1.30	+1.30	+1.30	+1.30	
Moderate Maintenance condition		+0.65	+0.65	+0.65	+0.65	
Type of soil:						
Soil type-I		-4.86	-4.86	-4.86	-4.86	
Soil type-II	-2.43	-2.43	-2.43	-2.43		
Soil type-III	0.00	0.00	0.00	0.00		
	Number of stories: Increment per storey	+0.10	+0.10	+0.10	+0.10	
FINAL SCORE, S=						
	Final score	S<1	1≤S<1.5	1.5≤S<2	2≤S<2.65	2.65<S
	Assigned damage grade	Grade 1	Grade 2	Grade 3	Grade 4	Grade 5
RECOMMENDED ACTION FOR DIFFERENT DAMAGE GRADE: Grade 1/2: Seismically safe but non-structural damage can be harmful to occupants so repairing work is recommended for the building Grade 3/4/5: Seismically not safe as structural damage will occur so further re-evaluation and retrofitting is recommended for the building					Recommended action to be taken for the existing building:	

Figura 3. Formulario propuesto por Ningthoujam & Nanda (2018) (FEMA 154 modificado)

En una búsqueda por mejorar la evaluación de seguridad de las edificaciones tras un sismo, luego del terremoto de Gorkha en 2015, Didier et al. (2017) utilizaron curvas de fragilidad presentes en la literatura para dimensionar los daños que posiblemente sufrieron las edificaciones tras este evento. Posteriormente, a partir de la información obtenida tras la caracterización llevada a cabo mediante un formulario ceñido al modelo RVDA (Rapid Visual Damage Assessment), similar al RVS (Figura 4), pero enfocado en los daños experimentados por la estructura tras un evento dado, en más de 60.000 edificaciones, se logró actualizar dichas curvas de fragilidad. En este estudio se estableció un nivel de daño clasificado en 3 posibles grados (Damage States o DS por sus siglas en inglés), DS1, DS2 y DS3, siendo DS1 el estado que muestra una casi inexistencia de daños (0-1% o 1-10% de daño) y DS3 el estado que corresponde a un colapso o irreparabilidad de la edificación (60-100% o 100% de daño). Se observó que los daños encontrados no corresponden netamente al nivel de sismicidad de la zona, que es alto, sino que también son correspondientes a la precariedad de las construcciones implementadas en esta región. El estudio permitió identificar que existen oportunidades de mejora en la toma de datos en campo para reducir las incertidumbres asociadas a los encuestadores. En este proyecto se envió a un grupo grande de encuestadores, sin haber recibido una adecuada capacitación técnica, según se menciona en el mismo escrito, para que ellos establecieran un nivel de daño mediante algunos indicadores visuales. Esto generó errores en campo. Los investigadores resaltan la importancia de la capacitación y sugieren una implementación breve y sencilla en la estructura del escrito para la formulación de preguntas, una distribución magnética de los formularios y una serie de indicadores que puedan facilitar el entendimiento de conceptos en la misma encuesta.

Rapid Evaluation Safety Assessment Form

Inspection
 Inspector ID: [Redacted] Inspection date and time: 207 2015-06-07 12:15 AM PM
 Organization: AEA Areas inspected: Exterior only Exterior and interior

Building Description
 Building Name: [Redacted] Address: Lalitpur
 Building contact/phone: [Redacted] District: Lalitpur
 Approx. "Footprint area" (sq. ft.): _____ Municipality/VDC: Lalitpur
 Ward No: _____ Tole: Shantinagar

Type of Construction
 Adobe Stone in mud Stone in cement Brick in cement Wood frame
 Bamboo Brick in mud Brick in cement R.C frame Others: _____

Type of Floor Flexible Rigid
Primary Occupancy: Residential Hospital Government office Police station
 Educational Industry Office Institute Mix
 Commercial Club Hotel/Restaurant Others: _____

Type of Roof Flexible Rigid

Evaluation	Minor/None	Moderate	Severe	Estimated Building Damage (excluding contents)
>Collapsed, partially collapsed, or moved off its foundation	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> None
>Building or any story is out of plumb	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> 0-1%
>Damage to primary structural members, cracking of walls, or other signs of distress present	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> 1-10%
>Parapet, chimney, or other falling hazard	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> 10-30%
>Large fissures in ground, massive ground movement, or slope displacement present	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> 30-60%
>Other hazard (Specify) e.g tree, power line etc:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> 60-100%
				<input type="checkbox"/> 100%

Comments: Minor cracks on walls and minor cracks seen on the lower portion of staircase (small extent)

Posting Choose a posting based on the evaluation and team judgment. Severe conditions endangering the overall building are grounds for an UNSAFE posting. Localized Severe and overall Moderate conditions may allow a Restricted Use posting. Post INSPECTED placed at main entrance. Post RESTRICTED USE and UNSAFE placards at all entrances.
 INSPECTED (Green placard) RESTRICTED USE (Yellow placard) UNSAFE (Red placard)
 Record any use and entry restrictions exactly as written on placard: _____

Further Actions Check the boxes below only if further actions are needed.
 Barricades needed in the following areas:
 Detailed evaluation recommended: Structural Geotechnical Other _____
 Comments: _____

Figura 4. Formulario propuesto por Didier et al. (2017)

Gentile et al. (2019), mediante la definición de dos arquetipos constructivos basados en las frecuencias de implementación encontradas en los diferentes parámetros implementados en edificaciones, calcularon un nuevo índice de priorización para la intervención constructiva en

Indonesia. Para esto se usó el formulario INSPIRE (Figura 5), un acercamiento indonesio a la Inspección Visual Rápida que contempla un diligenciamiento realizado por un ingeniero entrenado (en aproximadamente 20 minutos), en 85 escuelas de concreto reforzado y una medición del desempeño estructural mediante el método de análisis no lineal (SLaMA) y el análisis Pushover.

The figure shows a completed INSPIRE form. The form is titled 'INSPIRE RAPID VISUAL SURVEY' and 'INDONESIA SCHOOL PROGRAMME TO INCREASE RESILIENCE'. It is divided into three main sections: General Info, Building Info, and Structural Info. The General Info section includes fields for Date, Time, Surveyor Name, School Compound Name/Address, GPS Coordinates, Position, Construction Year, Confidence, and various survey details. The Building Info section includes a 'Simple Building Plan' diagram, dimensions of the building and rooms, and details about the building's structure and materials. The Structural Info section includes a table for 'Material of Lateral Resisting System' and 'Vulnerability Factors', and a section for 'Provide extra information (optional)' with a hand-drawn sketch of a building. The form also includes instructions for specific cells and a list of vulnerability factors.

Figura 5. Formulario INSPIRE diligenciado para el estudio, Gentile et al. (2019)

Caparos et al. (2017) utilizaron el formulario FEMA 154 propuesta por la Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2015 (ver Figura 6) y buscaron mejorar las prácticas de monitorización de las edificaciones pertenecientes a escuelas públicas en Filipinas mediante la creación de una base de datos con sistemas de información geográfica (GIS). El objetivo del trabajo consistió en poder clasificar y priorizar fácilmente las escuelas públicas, a partir de herramientas de consulta y de resultados gráficos que permitan tomar decisiones en la determinación de qué edificaciones deben ser priorizadas para una evaluación detallada.

Con el fin de medir el daño en edificaciones tras el sismo de 2018 de Lombok, Indonesia, Pujianto et al. (2019) realizaron una encuesta a un total de 15 escuelas, no resistentes a sismos, compuestas por uno o dos pisos y construidas en mampostería simple, tomadas al azar de los diferentes distritos de dicha ciudad. En esta encuesta se definió un total de 4 posibles estados de daño y se estandarizó la percepción del daño mediante la implementación de medidas para los mismos de acuerdo con el espesor de las grietas. Se evaluó la componente vertical mediante las condiciones de las columnas, de los muros, de las conexiones entre los muros y las columnas y de las conexiones entre las vigas y las columnas, la componente horizontal mediante las condiciones de las vigas, losas y techos y la componente de las fundaciones.

Mohamad et al. (2019) presentan el procedimiento llevado a cabo mediante la aplicación de la encuesta FEMA 154 (ver Figura 6) a un total de 245 edificaciones, cuya información se encuentra alojada en bases de datos de sistemas de información geográfica. En esta aplicación se detalla el porqué de cada aspecto de la encuesta, el uso de los puntajes finales y las conclusiones para el total de edificaciones encuestadas.

Adhikari et al. (2019) obtuvieron datos de escuelas afectadas por el sismo de Gorka, Nepal presentado en abril de 2015. Los datos se recopilaban a través del uso de una encuesta aplicada en dos fases: en la primera fase se evaluaron 3.115 escuelas de 9.259 y en la segunda fase de 2.653 escuelas de 8.341 edificaciones. Se obtuvo información acerca del comportamiento de estas edificaciones en términos de curvas de fragilidad y de aceleración pico del suelo (Peak Ground Acceleration o PGA por sus siglas en inglés) para las tipologías constructivas más utilizadas en el país. Las tipologías más comunes identificadas en estas escuelas encuestadas fueron las estructuras de concreto reforzado, mampostería de piedra, mampostería de ladrillo, estructuras metálicas, estructuras de madera y estructuras mixtas.

PHOTOGRAPH	Address: _____ Zip: _____ Other Identifiers: _____ Building Name: _____ Use: _____ Latitude: _____ Longitude: _____ Ss: _____ S: _____ Screener(s): _____ Date/Time: _____																	
	No. Stories: Above Grade: _____ Below Grade: _____ Year Built: _____ <input type="checkbox"/> EST Total Floor Area (sq. ft.): _____ Code Year: _____ Additions: <input type="checkbox"/> None <input type="checkbox"/> Yes, Year(s) Built: _____																	
	Occupancy: Assembly <input type="checkbox"/> Commercial <input type="checkbox"/> Emer. Services <input type="checkbox"/> Historic <input type="checkbox"/> Shelter Industrial <input type="checkbox"/> Office <input type="checkbox"/> School <input type="checkbox"/> Government Utility <input type="checkbox"/> Warehouse <input type="checkbox"/> Residential, #Units: _____																	
	Soil Type: <input type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/> C <input type="checkbox"/> D <input type="checkbox"/> E <input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> DNK Hard Avg Dense Stiff Soft Poor Rock Rock Soil Soil Soil Soil If DNK, assume Type D.																	
	Geologic Hazards: Liquefaction: Yes/No/DNK Landslide: Yes/No/DNK Surf. Rupt.: Yes/No/DNK Adjacency: <input type="checkbox"/> Pounding <input type="checkbox"/> Falling Hazards from Taller Adjacent Building Irregularities: <input type="checkbox"/> Vertical (type/severity) _____ <input type="checkbox"/> Plan (type) _____																	
	Exterior Falling Hazards: <input type="checkbox"/> Unbraced Chimneys <input type="checkbox"/> Heavy Cladding or Heavy Veneer <input type="checkbox"/> Parapets <input type="checkbox"/> Appendages <input type="checkbox"/> Other: _____																	
	COMMENTS: <input type="checkbox"/> Additional sketches or comments on separate page																	
SKETCH																		
BASIC SCORE, MODIFIERS, AND FINAL LEVEL 1 SCORE, S_{L1}																		
FEMA BUILDING TYPE	Do Not Know	W1	W1A	W2	S1 (MRF)	S2 (BF)	S3 (LM)	S4 (RC SW)	S5 (URM INF)	C1 (MRF)	C2 (SW)	C3 (URM INF)	PC1 (TL)	PC2	RM1 (FD)	RM2 (RD)	URM	MH
Basic Score	3.6	3.2	2.9	2.1	2.0	2.6	2.0	1.7	1.5	2.0	1.2	1.6	1.4	1.7	1.7	1.0	1.5	
Severe Vertical Irregularity, V_{L1}	-1.2	-1.2	-1.2	-1.0	-1.0	-1.1	-1.0	-0.8	-0.9	-1.0	-0.7	-1.0	-0.9	-0.9	-0.9	-0.7	NA	
Moderate Vertical Irregularity, V_{L1}	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6	-0.6	-0.7	-0.6	-0.5	-0.5	-0.6	-0.4	-0.6	-0.5	-0.5	-0.5	-0.4	NA	
Plan Irregularity, P_{L1}	-1.1	-1.0	-1.0	-0.8	-0.7	-0.9	-0.7	-0.6	-0.6	-0.8	-0.5	-0.7	-0.6	-0.7	-0.7	-0.4	NA	
Pre-Code	-1.1	-1.0	-0.9	-0.6	-0.6	-0.8	-0.6	-0.2	-0.4	-0.7	-0.1	-0.5	-0.3	-0.5	-0.5	0.0	-0.1	
Post-Benchmark	1.6	1.9	2.2	1.4	1.4	1.1	1.9	NA	1.9	2.1	NA	2.0	2.4	2.1	2.1	NA	1.2	
Soil Type A or B	0.1	0.3	0.5	0.4	0.6	0.1	0.6	0.5	0.4	0.5	0.3	0.6	0.4	0.5	0.5	0.3	0.3	
Soil Type E (1-3 stories)	0.2	0.2	0.1	-0.2	-0.4	0.2	-0.1	-0.4	0.0	0.0	-0.2	-0.3	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.4	
Soil Type E (> 3 stories)	-0.3	-0.6	-0.9	-0.6	-0.6	NA	-0.6	-0.4	-0.5	-0.7	-0.3	NA	-0.4	-0.5	-0.6	-0.2	NA	
Minimum Score, S_{MIN}	1.1	0.9	0.7	0.5	0.5	0.6	0.5	0.5	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	1.0	
FINAL LEVEL 1 SCORE, $S_{L1} \geq S_{MIN}$																		
EXTENT OF REVIEW Exterior: <input type="checkbox"/> Partial <input type="checkbox"/> All Sides <input type="checkbox"/> Aerial Interior: <input type="checkbox"/> None <input type="checkbox"/> Visible <input type="checkbox"/> Entered Drawings Reviewed: <input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> No Soil Type Source: _____ Geologic Hazards Source: _____ Contact Person: _____					OTHER HAZARDS Are There Hazards That Trigger A Detailed Structural Evaluation? <input type="checkbox"/> Pounding potential (unless $S_{L2} >$ cut-off, if known) <input type="checkbox"/> Falling hazards from taller adjacent building <input type="checkbox"/> Geologic hazards or Soil Type F <input type="checkbox"/> Significant damage/deterioration to the structural system					ACTION REQUIRED Detailed Structural Evaluation Required? <input type="checkbox"/> Yes, unknown FEMA building type or other building <input type="checkbox"/> Yes, score less than cut-off <input type="checkbox"/> Yes, other hazards present <input type="checkbox"/> No Detailed Nonstructural Evaluation Recommended? (check one) <input type="checkbox"/> Yes, nonstructural hazards identified that should be evaluated <input type="checkbox"/> No, nonstructural hazards exist that may require mitigation, but a detailed evaluation is not necessary <input type="checkbox"/> No, no nonstructural hazards identified <input type="checkbox"/> DNK								
Where information cannot be verified, screener shall note the following: EST = Estimated or unreliable data OR DNK = Do Not Know																		

Figura 6. Formulario FEMA 154 Lizundia et al., (2014)

Meneses-Loja & Aguilar, (2004) realizaron una evaluación de la vulnerabilidad sísmica en diferentes escuelas de los distritos de Chorrillos y Barranco en Lima, Perú, a través de una RVS implementada con la ayuda del formulario que se puede ver en la Figura 7. Esta evaluación permitió conocer el posible comportamiento sísmico que tendrían estos centros educativos ante

la ocurrencia de un evento sísmico y diversas características relevantes de estas edificaciones como las tipologías estructurales más empleadas.

En este estudio, Meneses-Loja & Aguilar, (2004), propusieron una metodología para la inspección visual consistente en una etapa previa, intermedia y posterior a la inspección de la escuela estudiada. En la etapa previa se realiza una selección y entrenamiento del personal que realizará la inspección a la vez que se reúne información que pueda ser útil para la recolección de los datos en campo. Posteriormente, en la etapa intermedia en donde se realiza la inspección de la escuela, se procede de forma organizada con la identificación de la tipología estructural, se realiza un pequeño esquema que sirva de guía para la evaluación posterior y se identifican aquellos aspectos que puedan modificar la capacidad de la estructura tales como irregularidad vertical, piso blando, entre otros. Finalmente, en la etapa posterior a la evaluación de la escuela, se procede a comprobar la validez de la información colectada y se procede con el análisis y procesamiento de la información para así determinar la vulnerabilidad sísmica de la estructura estudiada.

S. Alcocer & Murià, (2018) realizaron la evaluación del desempeño a partir de información recolectada tras el sismo de México del 2017, posteriormente Alcocer et al., (2020) discutieron estas evaluaciones a partir de las edificaciones representativas seleccionadas según los materiales, prototipos, año de diseño y construcción. Un total de 124 edificaciones en 32 escuelas fueron inspeccionadas. De estas se evaluaron las características dinámicas de 14 estructuras en una prueba de vibración con miras a identificar las frecuencias de vibración significativas de las tipologías estructurales más representativas para un posterior uso en la calibración de un modelo numérico. De esto se pudo encontrar que características como el año de construcción (particularmente el identificar si fue antes o después de 1985), la longitud del vano de las vigas, la cantidad de pisos y el riesgo sísmico de la zona en donde se construyó la edificación, son clave para la determinación del comportamiento de estas edificaciones.

ATC-21 CISMID - UNI/LAB. GEOTECNICO												
RECONOCIMIENTO VISUAL RÁPIDO DE VULNERABILIDAD SISMICA DE EDIFICACIONES												
						Direccion: Calle Miraflores 406		Distrito: Barranco				
						Dpto.-País: Lima - Peru						
						Fecha N°: 4		Fecha: 17 setiembre 2001				
						Inspector: E. B. F.		Año Constr.:				
						Area Total (m2):		Numero de Pisos: 2				
						Nombre del Colegio: Manuel Montero Bernales						
TIPO DE COLEGIO		NIVEL EDUCATIVO				TURNO			N° DE ALUMNOS		Riesgo de Daño No Estructural	
		INICIAL	PRIMAR	SECUN.	C.E.O.	DIURN	TARD.	NOCH.			<input type="checkbox"/>	
Estatal Mn. de Educ.	X		X			X	X				CONFIABILIDAD DE LOS DATOS	
Estatal otro sect. (MI.)									0-100		* = Dato no confiable, Estimado o Subjetivo	
Parroquial									100-500		NSC = No se conoce	
Particular									500+	X		
Especial												
PUNTAJE DE LA ESTRUCTURA Y MODIFICADORES												
TIPO DE EDIFICACION	M	S1	S2	S3	S4	C1	C2	C3/S5	PC1	PC2	RM	URM
Puntaje Basico		/AB	/R	/M	/C/M	/M/E	/M	/R/M/E	/T			
Riesgo por Altura	N/A			N/A				V		N/A		
Condicion Pobre								V				
Irregularidad Vertical								V				
Piso Blando								V				
Torsion												
Irregularid. en Planta												
Sobrecarga	N/A			N/A			N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Peligro de Fachada	N/A		N/A	N/A	N/A		N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Columnas Cortas	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A			V	N/A	N/A	N/A	N/A
Años de Construido								N/A				N/A
SL2								V				
SL3												
SL3 & 8 a 20 pisos	N/A			N/A						N/A		
PUNTAJE FINAL												
COMENTARIOS											Requiere Evaluacion Detallada?	
No esta en esquina											SI	NO

Figura 7. Formulario implementado por Meneses-Loja & Aguilar, (2004)

2.2. PROPUESTA DEL PRESENTE ESTUDIO

Buscando una implementación que permitiera recopilar toda la información útil para este y otros estudios en planta pudiesen ser llevados a cabo en un futuro con la información de los Centros Educativos Rurales inspeccionados, el formulario propuesto en este estudio cuenta con tres diferentes módulos, plasmados, inicialmente, en un formulario virtual implementado en campo

mediante sus versiones impresas en hojas de papel. Tras varias revisiones, fue plasmado en un aplicativo móvil que facilita el acceso a una mayor cantidad de personas que cuenten o no con conexión a internet a lo largo de su día, mediante una funcionalidad que permite almacenar la información incluida en el formulario hasta el momento en que se encuentre el dispositivo usado para el diligenciamiento conectado nuevamente a la red. El primero de estos módulos del formulario propuesto es dedicado a la obtención de información general y de contacto (Figura 8). En esta sección se registra información tal como la fecha de realización de la encuesta, el nombre del encuestador, información del contacto en el CER, el nombre de la institución, su ubicación, número de estudiantes, de aulas, de jornadas e información referente a las características administrativas del CER. Esto con el fin de implementar una posible clasificación según características que puedan ser determinadas como diferenciadoras a lo largo del estudio y de lograr una fácil ubicación y comunicación con el personal de contacto.

MÓDULO 1	
Fecha: _____	Nombre encuestador: _____
Tel. Contacto: _____	Cargo contacto: _____
e-mail contacto: _____	
Nombre de la institución: _____	Coordenadas: _____
Municipio: _____	Corregimiento: _____ Dirección: _____
Número de estudiantes: _____	Número de profesores y/o funcionarios: _____
Número de aulas: _____	Jornadas: _____ Estrato: _____
Nivel de enseñanza de la institución: _____	
Dominio de la institución (Pública, privada, etc.): _____	
<u>Nota: Recordar tomar fotografía panorámica, de fachada principal, de fachada posterior, lateral 1 y lateral 2.</u>	

Figura 8. Módulo 1, Formulario propuesto, Fuente: Elaboración propia

El segundo módulo (Figura 9) busca recopilar información de la estructura y de su estado. Se registra información con respecto al número de pisos, año de construcción, las diferentes dimensiones de la edificación, el sistema estructural, la ubicación de fisuras, grietas o desprendimientos en elementos estructurales y no estructurales y otros aspectos que el encuestador o el contacto consideren importantes para el proceso. El objetivo principal de este módulo es, inicialmente, la determinación de macro parámetros útiles en la definición de los diferentes criterios a tener en cuenta en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica del CER.

MÓDULO 2			
Número de pisos: _____	Año de construcción: _____		
Altura muros (m): _____	Longitud del frente (m): _____	Longitud del fondo (m): _____	
Sistema estructural:			
Concreto <input type="checkbox"/>	Tapia <input type="checkbox"/>	Mampostería simple <input type="checkbox"/>	Mampostería confinada <input type="checkbox"/>
Otro <input type="checkbox"/>	¿Cuál(es)? _____		
Tipo de cimentación:			
Zapatas <input type="checkbox"/>	Losa de cimentación <input type="checkbox"/>	Vigas de cimentación <input type="checkbox"/>	
Desconocido <input type="checkbox"/>	Otro <input type="checkbox"/>	¿Cuál? _____	
Tipo de tejado:			
Losa <input type="checkbox"/>	Lámina <input type="checkbox"/>	Tejas <input type="checkbox"/>	Otro <input type="checkbox"/> ¿Cuál? _____
Area total de Muros por piso:			
Mampostería (cm ²): _____	Muros concreto (cm ²): _____	Tapia (cm ²): _____	
Columnas (cm ²): _____			
	Fisuras	Grietas	Desprendimientos
Muros de fachada	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Muros interiores	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Columnas	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Vigas	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Techo	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Pisos	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Escaleras	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Balcones	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Otros aspectos relevantes y/o comentarios:			
<small>Nota: Recordar tomar fotografías del deterioro (hasta 10).</small>			

Figura 9. Módulo 2, Formulario propuesto, Fuente: Elaboración propia

El tercer módulo implementado en el formulario (Figura 10) contiene preguntas referentes a temáticas que permiten evaluar varios factores tales como los eventos históricos que han ocurrido en el sitio, el nivel de conocimiento y preparación en cuanto las diferentes amenazas existentes en la zona y la capacidad de respuesta de la comunidad.

No obstante, esta información no es objeto de estudio del presente trabajo. En esta sección se recopila información relacionada con el manejo o no de planes de emergencia, la existencia de fuentes de amenaza en las cercanías del CER y la descripción del sistema de conducción de agua en el CER, entre otros. Cabe resaltar, pese a lo mencionado inicialmente del objeto de estudio del presente trabajo, que las preguntas relacionadas con el manejo de aguas en la estructura inspeccionada si serán consideradas ya que se evidenció que esta variable es significativa en el cálculo de la vulnerabilidad del CER.

MÓDULO 3				
Grietas en el terrero	No <input type="checkbox"/>	Sí <input type="checkbox"/>	Tamaño: _____	
Ubicación: _____				
Deslizamientos	No <input type="checkbox"/>	Sí <input type="checkbox"/>	Tamaño: _____	
Ubicación: _____				
Cárcavas o surcos	No <input type="checkbox"/>	Sí <input type="checkbox"/>	Tamaño: _____	
Ubicación: _____				
Huecos en terreno	No <input type="checkbox"/>	Sí <input type="checkbox"/>	Tamaño: _____	
Ubicación: _____				
Árboles, postes o cercos inclinados en inmediación	No <input type="checkbox"/>	Sí <input type="checkbox"/>		
Ubicación: _____				
Afloramientos de agua o nacimientos cercanos	No <input type="checkbox"/>	Sí <input type="checkbox"/>		
Distancia a la escuela: _____				
Ríos o quebradas en inmediaciones de la escuela	No <input type="checkbox"/>	Sí <input type="checkbox"/>		
Distancia a la escuela y nombre de afluente: _____				
Observaciones y descripciones del estado actual				
Vegetación presente en las inmediaciones de la escuela				
Bosque	<input type="checkbox"/>	Potreros	<input type="checkbox"/>	Rastrojos <input type="checkbox"/>
				Cultivos <input type="checkbox"/>
Método de disposición final de las aguas residuales de la escuela				
Campo de infiltración	<input type="checkbox"/>	Fuentes de agua	<input type="checkbox"/>	Campo abierto <input type="checkbox"/>
				Sumidero <input type="checkbox"/>
Tipo de transporte de agua para el consumo del personal de la escuela				
Acequía (Zanja)	<input type="checkbox"/>	Tubería	<input type="checkbox"/>	Manguera <input type="checkbox"/>
Conducción de agua	Superficial <input type="checkbox"/>		Subterránea <input type="checkbox"/>	
Deslizamientos de tierra	Sí <input type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>	Año de ocurrencia: _____	
Inundaciones	Sí <input type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>	Año de ocurrencia: _____	
Asentamientos en el suelo	Sí <input type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>	Año de ocurrencia: _____	
Tormenta	Sí <input type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>	Año de ocurrencia: _____	
Sismos/Terremotos	Sí <input type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>	Año de ocurrencia: _____	
Otro	Sí <input type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>	¿Cuál? _____	
Heridos	Sí <input type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>	¿Cuántos? _____	
¿Existe comité escolar de gestión del riesgo activo?	No <input type="checkbox"/>	Sí <input type="checkbox"/>		
¿Existe Plan escolar de Gestión del Riesgo?	No <input type="checkbox"/>	Sí <input type="checkbox"/>		
¿Reciben capacitación periódica relacionada con la Gestión Escolar del Riesgo?	No <input type="checkbox"/>	Sí <input type="checkbox"/>		
¿Existe señalización relacionada con la gestión escolar del riesgo en la escuela?	No <input type="checkbox"/>	Sí <input type="checkbox"/>		
¿Realizan simulacros de evacuación periódicamente?	No <input type="checkbox"/>	Sí <input type="checkbox"/>		

Figura 10. Módulo 3, Formulario propuesto, Fuente: Elaboración propia

Como parte del proceso de diseño del formulario que se presentó anteriormente, se eligió el Municipio de Jericó, Antioquia para realizar una prueba piloto con la primera versión impresa del formulario. En conjunto, dicha visita y otras realizadas posteriormente, permitieron el ajuste

del formulario a una versión que, gracias a la implementación de un lenguaje y disposición más amigable y a la exclusión de preguntas redundantes, permitiese requerir una menor capacitación para su diligenciamiento, resultando el mismo en la implementación de una versión magnética que, además de lo ya mencionado, permite el diligenciamiento de la información sin requerir una conexión constante a la red, almacenando la información diligenciada hasta el momento en que el dispositivo desde el que se diligencie dicho formulario esté nuevamente conectado a la red. Esta versión magnética, distribuida a través de una aplicación móvil, facilita también la inclusión de material audiovisual como fotografías de la estructura y del sitio en el que se emplaza, así como audios descriptivos de particularidades que posea la edificación o la zona.



Figura 11. Portada formulario magnético.

En la Figura 11 se puede ver la portada o primera pantalla del aplicativo en la cual, mediante el botón "crear formulario" se podrá disponer la información del CER inspeccionado en el aplicativo y guardarla como borrador, en caso de no disponer de una conexión, o guardarla

para su envío a la base de datos del proyecto. El formulario posee un total de tres secciones, siendo la primera dedicada a aspectos sociales, de ubicación y contacto, la segunda a aspectos propios de la estructura o estructuras del CER y la tercera dedicada a aspectos geológicos relacionados con el entorno, con el manejo de recursos, con el historial de desastres y con la vulnerabilidad institucional del CER inspeccionado.



Figura 12. Ejemplo ayudas gráficas de formulario

El aplicativo incorpora un menú desplegable de ayuda, el cual se activa mediante un símbolo de interrogación ubicado al costado de cada una de las preguntas del formulario. La ayuda consiste en proporcionar ejemplos visuales y explicaciones cortas que permitan dar respuesta a la pregunta formulada o ingresar la información solicitada. Un ejemplo de lo anterior para la pregunta del número de módulos se puede ver en la Figura 12 en donde se pueden apreciar las ayudas gráficas para la identificación del número de módulos estructurales que posee un CER.

La segunda sección del formulario inicia solicitando información acerca del número de módulos que posee el CER inspeccionado, el origen de esta pregunta se encuentra en la implementación del primer formulario en campo, en donde al llegar a varios CERs del municipio de Jericó, Antioquia, se pudo evidenciar que muchos de ellos tenían más de un módulo estructural y que entre dichos módulos podía variar no solo la forma sino la tipología estructural, la altura, el tipo de cubierta, entre otros.

Al indicar el número de módulos del CER se despliega un menú con el resto de información solicitada para la estructura inspeccionada, con las siguientes preguntas:

- Número de pisos: Este desplegable permite indicar el número de pisos o niveles del módulo inspeccionado del CER evaluado. La importancia de esta variable radica en el peso que soporta la estructura en su primer nivel y el posible comportamiento que puede llegar a tener ante un eventual evento sísmico.
- Año de construcción: Desplegable que permite, mediante rangos, indicar un año estimado de construcción para determinar el código o normatividad vigente en el momento.
- Medidas: En este espacio se indicará la altura de la fachada, la longitud del frente y la longitud de fondo del módulo, ya que es posible afirmar, según lo encontrado en campo, que la mayoría de los módulos estructurales de los CERs cuentan con una forma rectangular en planta. Esta información es útil para evaluar la vulnerabilidad del muro ante la falla fuera el plano en conjunto con la información de otras variables que se extraerán más adelante.
- Sistema estructural: Esta pregunta permite diferenciar entre tipologías estructurales por las características más evidentes de las mismas, por ejemplo, para el sistema aporticado se tiene una selección con la opción de columnas y vigas. Los sistemas estructurales que se pueden seleccionar son los siguientes:

- Columnas y vigas
- Muros de tapia
- Muros de ladrillo
- Mampostería de ladrillo y vigas de concreto
- Muros de ladrillo, columnas y vigas de concreto
- Muros de bloque de concreto
- Mixto
- Otro

De esta información es posible extraer datos acerca de espesores de muros según los ladrillos de uso común en la zona o información acerca de si la metodología para la evaluación de la vulnerabilidad propuesta en el presente estudio aplica o no para el CER estudiado según la tipología de falla común del tipo de estructura encontrado.

- Esquema: En esta pregunta se pretende que el profesional o encargado de diligenciar el formulario genere un esquema a mano alzada del módulo estructural evaluado en donde se ubiquen columnas, separación entre ellas y, de ser posible, espesores de muro, para finalmente adjuntar, en el espacio destinado para ello en el formulario, una fotografía de dicho esquema.
- Tipo de cimentación: Se pregunta si es posible o no identificar o apreciar un sistema de cimentación en la estructura, en caso afirmativo se adjuntará una fotografía de esta.
- Forma y tipo de techo: En esta pregunta se dispone de ilustraciones que permiten facilitar la identificación del tipo de cubierta que posee el módulo estructural evaluado, puesto que dicha disposición puede influenciar en la infraestructura necesaria para el manejo de aguas lluvias y en las cargas a las que puede estar expuesto un muro por acción de la cubierta del módulo estructural. Una vez se

indica la forma de la cubierta se procede a indicar la composición de esta mediante las siguientes opciones:

- Losa de concreto
- Vigas y tablillas de madera con tejas de barro
- Vigas y tablillas de madera con tejas de cemento
- Vigas o cerchas de acero con tejas de cemento
- Láminas de asbesto cemento
- Otro

Identificar la composición de la cubierta permite calcular la carga aproximada que soporta el muro más vulnerable del CER estudiado.

- Infraestructura: Este espacio está destinado a la información concerniente a los daños que presenta el módulo estructural evaluado mediante la opción de evidencia de fisuras y grietas, riesgo de colapso o ningún daño en los muros de fachada, muros interiores, columnas, vigas, techos, pisos, escaleras, balcones y otros aspectos que quiera destacar el profesional o el encargado de diligenciar el formulario. Con esta información es posible identificar si la importancia de los daños presentes en la estructura son lo suficientemente significativos como para que el resto de las variables de la evaluación de vulnerabilidad cobren o no una mayor importancia.
- Fotos del módulo: En este espacio se pretende que el encargado de diligenciar el formulario anexe un máximo de 10 fotografías del módulo para la obtención de información que se pudiese llegar a escapar al momento de evaluar la estructura.

Este aplicativo cuenta con una guía publicada por Jauregui Estupiñan et al., (2022) que puede ser obtenida de forma gratuita mediante una solicitud escrita al correo electrónico EscuelasRuralesAnt@hotmail.com.

3. CASO DE ESTUDIO – MUNICIPIO DE JERICÓ, ANTIOQUIA

El municipio de Jericó, ubicado en la subregión Suroeste de Antioquia, no ha sido ajeno a los eventos sísmicos a lo largo de su historia, puesto que se han registrado por lo menos cinco sismos importantes desde el año 1961, es este año se registró un evento con una intensidad máxima de 7 MM (Mercalli Modificada) y tras esto, en los años 1962, 1973, 1973, 1979 se registraron, respectivamente, eventos sísmicos con intensidades en sitio de 8, 4, 4 y 7 en la escala Mercalli Modificada (Servicio Geológico Colombiano, 2016), lo cual brinda una idea general del nivel de amenaza sísmica al que se ve sometida esta población.

En el marco del proyecto Escuelas Rurales Seguras y del presente estudio, el 15 y 16 de marzo del 2021 se realizó una visita técnica a 19 Centros Educativos Rurales del municipio de Jericó, Antioquia por parte del grupo técnico de investigadores. Para llevar a cabo la visita, se conformaron dos comisiones técnicas, cada una de ellas integrada por un investigador con experiencia en ingeniería sísmica y estructural, un investigador con experiencia en ingeniería geológica y un estudiante auxiliar. La visita técnica se enfocó en la validación del formulario de levantamiento de información previamente mostrado (Figura 8, Figura 9 y Figura 10) y en la identificación de posibles parámetros recurrentes que se puedan llegar a evidenciar en los CERs con el fin de establecer patrones que permitan facilitar el estudio de la vulnerabilidad de las edificaciones tratadas.

3.1. DESCRIPCIÓN DE LOS CENTROS EDUCATIVOS RURALES

Se visitaron en total 19 CERs que se muestran en la Tabla 2. La totalidad de CERs visitados son públicos y ofrecen, en su gran mayoría, una educación básica primaria. Una gran parte de estos CERs está compuesta por un solo módulo estructural en el cual se encuentran distribuidos los salones de clase, la cocina, los baños, el almacén, entre otros. Durante este trabajo de campo, se pudo constatar que cada CER está a cargo de un solo profesor, el cual es el responsable de los temas académicos, administrativos y de logística.

Tabla 2. Características principales generales de los CERs

ID	CER	NO. ESTUDIANTES	NO. MÓDULOS	SISTEMA ESTRUCTURAL	CIMENTACIÓN	CUBIERTA
1	CER Monseñor Augusto Trujillo Arango	11	1	Mampostería semi confinada	Desconocido	Teja de barro
2	CER Álvaro Ardulio Naranjo	10	2	Mampostería simple	Solado	Teja de asbesto cemento
3	CER Ana María Echeverry	21	1	Mampostería confinada	Vigas de cimentación	Teja de asbesto cemento
4	CER Estrella Vieja	10	1	Mampostería simple	Desconocido	Teja de barro
5	I.E. Rural San Francisco de Asís - Sede Pbro. Alfredo Gonzalez G.	120	2	Mampostería confinada	Desconocido	Teja de barro
6	I.E. Rural San Francisco de Asís - Sede Cestillala	9	1	N/A	N/A	Teja de asbesto cemento
7	CER Avelino Marín B.	13	2	Mampostería semi confinada	Solado	Lámina polimérica
8	I.E. San Francisco de Asís - Palo Cabildo	135	1	Aporticado	Desconocido	Lámina polimérica
9	CER La Viña	N/A	N/A	N/A	N/A	Teja de barro
10	CER Palenque	N/A	2	Mampostería simple	Desconocido	Teja de asbesto cemento
11	CER Palenquito	N/A	N/A	N/A	N/A	Teja de barro
12	CER Guacamayal	N/A	1	Mampostería simple	Desconocido	Teja de barro
13	CER Santiago Santa María	20	1	Mampostería semi confinada	Desconocido	Teja de barro
14	CER La Pradera	1	1	Mampostería semi confinada	Losa de cimentación	Teja de barro
15	Escuela Nueva La Leona	7	2	Mampostería semi confinada	Losa de cimentación	Teja de asbesto cemento
16	Escuela La Cascada Normal	11	1	Mampostería semi confinada	Losa de cimentación	Teja de barro
17	CER Patudal	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
18	CER Cauca Viejo	30	1	Tapia	Desconocido	Teja de barro
19	CER La Sorga	6	1	Mampostería Simple	Desconocido	Teja de barro

En la Figura 13a, se muestra la distribución de los CERs con base en el número de módulos estructurales. Se puede observar que 11 tienen un solo módulo, 5 tienen dos módulos y en 3 de ellos no fue posible determinar la cantidad de módulos estructurales.

En los 19 Centros Educativos Rurales visitados se inspeccionaron 24 módulos estructurales y se pudo comprobar que, aunque existían diversas formas en planta para estos mismos, la gran mayoría, 15 de estos, contaban con una forma rectangular, 5 tenían una forma en “L” y 1 presentaba una forma cuadrada (Figura 13b).

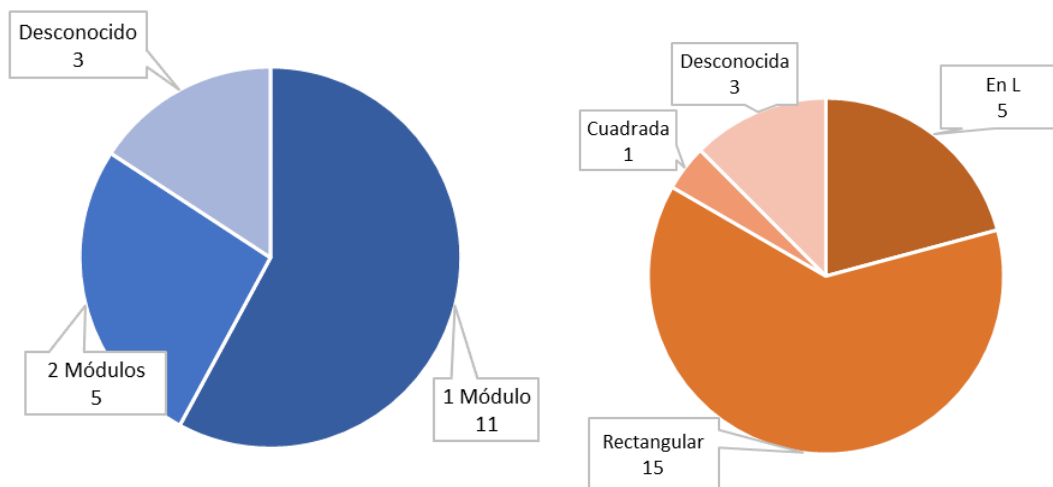


Figura 13. Cantidad (a) y forma (b) de módulos estructurales de los CERs visitados

La composición estructural de las edificaciones variaba desde la cimentación, en donde prevaleció el desconocimiento de estas debido a la incapacidad de verificar visualmente el tipo de cimentación y a la inexistencia de información accesible sobre este aspecto durante la visita realizada, sin embargo, es posible notar que se implementan métodos inadecuados para estos como el solado (2 edificaciones), que no es más que una mejora de la superficie del suelo en la base de algunas edificaciones con la ayuda de una delgada capa de concreto de baja resistencia. Otras tantas edificaciones, 3 en total, presentaron una losa de cimentación en el nivel cero de la edificación y, finalmente, fue posible identificar en 1 caso la existencia de vigas de cimentación en una instalación tal y como se observa en la Figura 14.

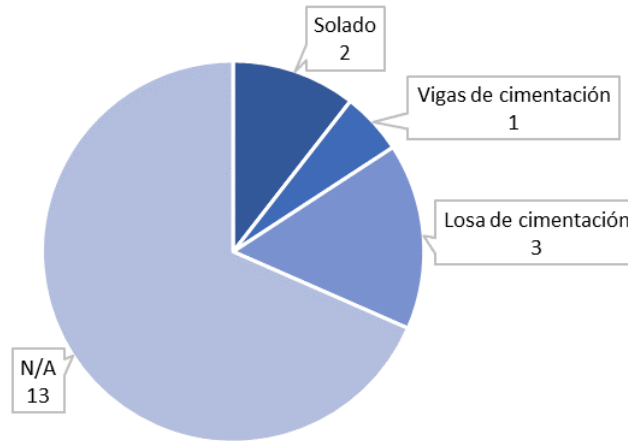


Figura 14. Cimentaciones identificadas en los módulos de los CERs visitados

En cuanto al sistema estructural de los CERs (ver Figura 15), 5 módulos corresponden a mampostería simple, 6 a mampostería semi confinada, 2 a mampostería confinada, 1 a pórtico de concreto, 1 módulo a construcción en tapia y 4 sistemas estructurales no pudieron ser identificados en campo. Predomina el uso de la mampostería (13 módulos estructurales). Debido a las falencias constructivas o a la ausencia de todos los requerimientos que se deben cumplir para poder clasificar el sistema como confinado, entre las cuales se destacan la ausencia de columnas o la separación excesiva entre las columnas existentes, la falta de conexión (o mala conexión) entre elementos, presencia de vacíos importantes en los muros sin el confinamiento adecuado, entre otros.

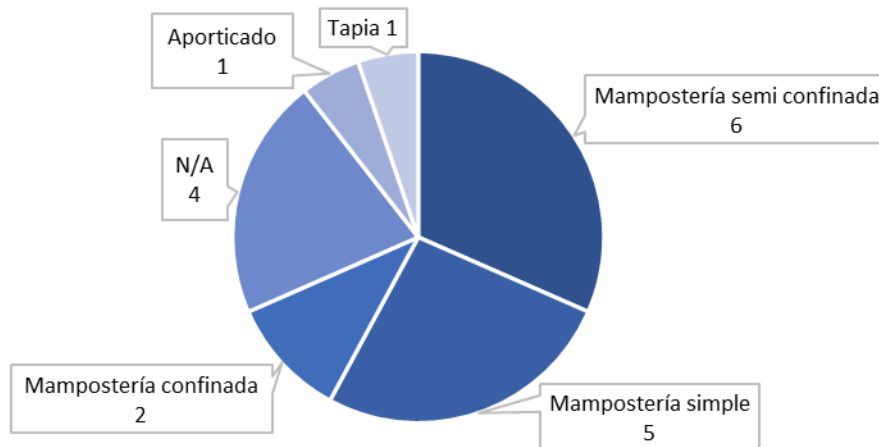


Figura 15. Sistemas estructurales identificados en los módulos de los CERs visitados

En los diferentes CERs visitados fue posible identificar el tipo de tejado que presentaban sus edificaciones, mostrando tres tipos; 2 muestras con el tejado en lámina polimérica, 5 módulos con tejas de asbesto cemento y 11 con tejas barro (Figura 16).

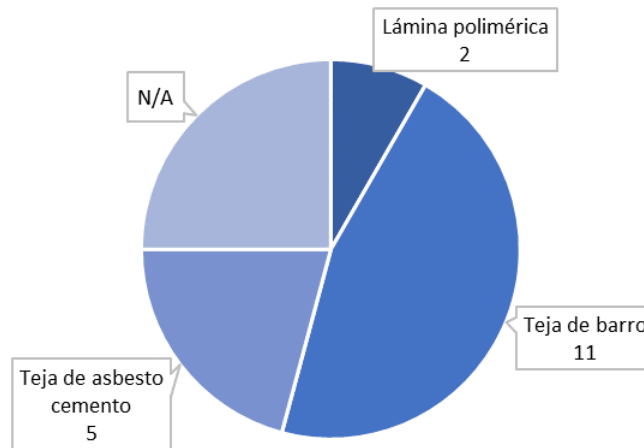


Figura 16. Tejados identificados en los módulos de los CERs visitados

En la totalidad de los módulos estructurales pertenecientes a los CERs visitados fue posible evidenciar una igualdad en la altura de muros entre las edificaciones de un mismo CER. En la Figura 17 se evidencia una altura promedio de 2,4 m, con oscilaciones comprendidas entre 2,4 y 2,8 m, sin dejar de lado algunos datos atípicos como muros de 4 y 3,4 m de altura.

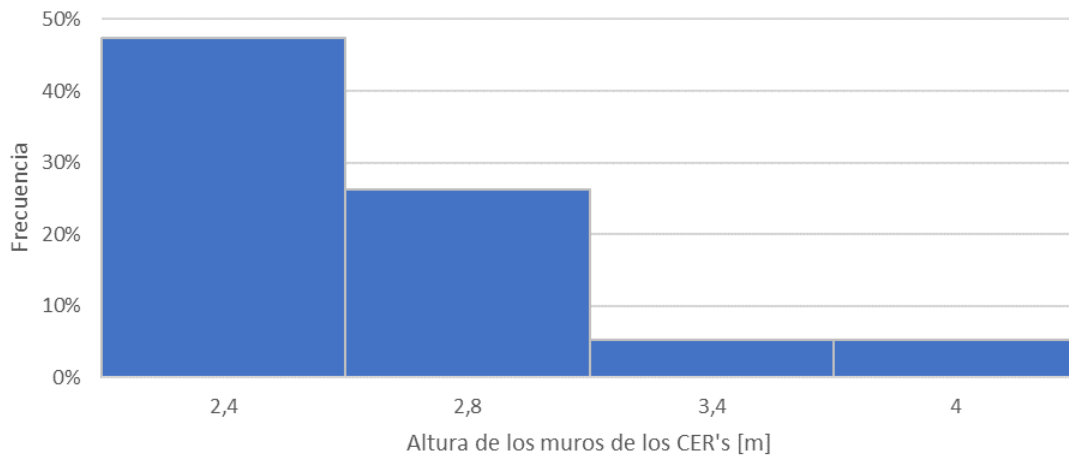


Figura 17. Distribución de frecuencia de la altura de muros de los CERs visitados

Con base en el registro tomado durante la inspección visual, se logró calcular un área promedio de 110 m², en las cuales imperó una dimensión 5,25 m de lado para las diferentes edificaciones rectangulares. En la Figura 18 se muestra una distribución de las áreas aproximadamente normal con una tendencia marcada hacia la media y un sesgo leve hacia la izquierda que indica una tendencia secundaria a áreas menores.

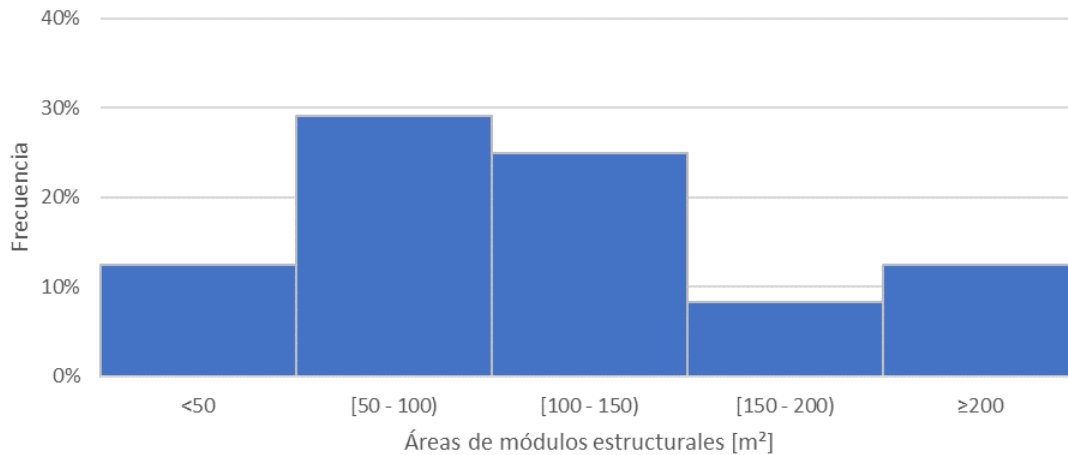


Figura 18. Distribución de frecuencia del área de los CERs visitados

Finalmente, en conjunto con las áreas totales calculadas para las edificaciones y con las diferentes longitudes de muro identificadas en campo, fue posible determinar la densidad de muros con un valor promedio de 6,76%, tal como se puede ver en la Figura 19.

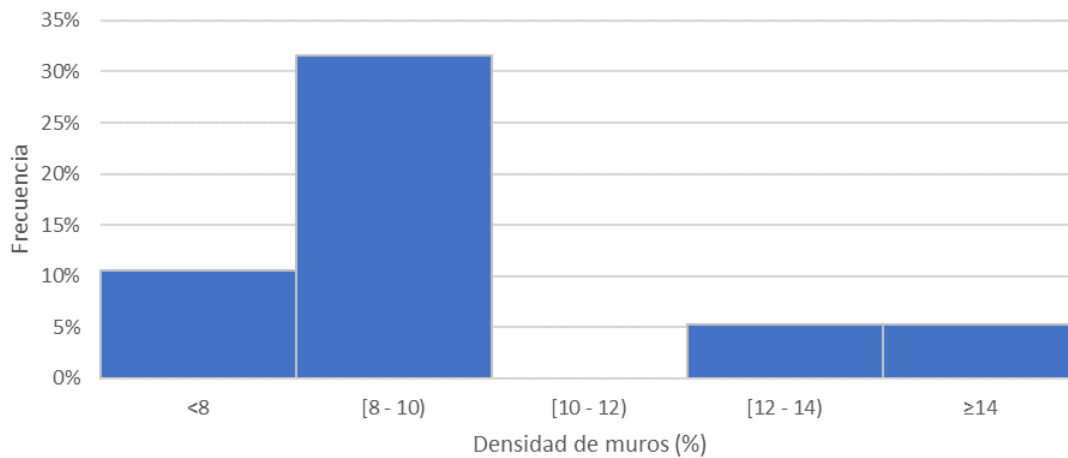


Figura 19. Distribución de la densidad de muros de los CERs visitados

3.2. INSPECCIÓN VISUAL Y DESCRIPCIÓN DE LOS DAÑOS EN LAS ESTRUCTURAS

Durante la visita técnica, se realizó una inspección visual con dos enfoques principales: el primero correspondió a aspectos estructurales y el segundo en los aspectos geológicos, sociales y de gestión del riesgo. A continuación, se describen los hallazgos encontrados por la comisión estructural.

3.2.1. Estado de los elementos estructurales y no estructurales

De los 19 CERs, se encontraron registros de fisuras o grietas en 3 centros educativos. Se observaron grietas en los muros de fachada, en muros interiores y en los pisos de los corredores. Este tipo de daño está asociado a fenómenos de asentamientos diferenciales del terreno.

Un análisis rápido del CER Álvaro Ardulio Naranjo (ID 2), indicó que dichos daños obedecen a los asentamientos diferenciales que sufre la estructura, debido a que uno de sus lados está contiguo a un muro de contención que, aparentemente, no posee la capacidad suficiente para sostener el área aferente de la estructura, provocando así una rotación de ésta que se evidencia en grietas verticales en muros correspondientes a la rotación observada en el piso (Figura 20).





Figura 20. Daños en la estructura del CER Álvaro Ardulio Naranjo (ID 2)

El CER Guacamayal (ID 12) presentó grietas importantes en la zona ubicada entre la estructura del hogar del viviente (encargado de la seguridad del recinto en todo momento) y la escuela en sí misma, pues la primera, al sufrir un asentamiento diferencial, presenta una rotación en su estructura y a la vez permite la generación de las grietas que se pueden ver en la Figura 21.



Figura 21. Daños en la estructura del CER Guacamayal (ID 12)

Además de lo mostrado anteriormente, otros dos CERs presentaron grietas, el CER Estrella Vieja (ID 4), presentó leves fisuras en algunas zonas de sus muros de fachada y problemas más graves que serán descritos más adelante. Finalmente, el CER Cauca Viejo (ID 18), presentó fisuras menores en algunos de sus muros fachada y columnas. El resto de Centro educativos visitados no presentaban daños en sus elementos estructurales o no estructurales.

3.2.2. Estado de las cubiertas

Durante la visita de campo, se identificaron serios problemas en las cubiertas de los Centros Educativos Rurales, los cuales se pueden clasificar en tres grupos: 1) ausencia de un amarre adecuado de las tejas al entramado que sirve de apoyo, 2) mala conservación y ausencia de mantenimiento en los sistemas de desagüe y 3) daños en tejas, vigas o cerchas producidos por el viento o desprendimiento de árboles. En la Figura 22 se muestran algunas imágenes de la cubierta del CER Álvaro Ardulio Naranjo (ID 2), en las cuales se puede apreciar el riesgo generado por una lámina mal implementada para generar cobertura en la zona comprendida entre los dos módulos estructurales del CER.



Figura 22. Estado de cubierta del CER Álvaro Ardulio Naranjo (ID 2)

En el CER Estrella Vieja (ID 4) se pueden apreciar diferentes situaciones generadoras de riesgo, la primera de ellas en la zona de comidas que está cubierta con un tejado de lámina que descansa sobre una estructura en madera simplemente apoyada sobre la baldosa de la escuela (Figura 23). La segunda situación generadora de riesgo está ubicada al interior del salón de este CER en donde se pueden apreciar algunas viguetas falladas que ponen en riesgo a los niños, profesores y a la estructura en sí misma.



Figura 23. Estado de cubierta del CER Estrella Vieja (ID 4)

El CER Avelino Marín B (ID 7) presenta un problema similar al mostrado anteriormente (Figura 24), pues la zona implementada como comedor posee una cubierta ligera simplemente apoyada sobre un semi muro perimetral que pone en riesgo al personal que hace uso de la instalación.



Figura 24. Estado de cubierta del CER Avelino Marín B (ID 7)

El CER Palenque (ID 10) presenta dos condiciones críticas, una en el apoyo de la cubierta y otra en la cubierta misma, pues en algunas zonas se cuenta con cerchas, implementadas para dar apoyo a la cubierta del CER, que interrumpen la continuidad de algunas vigas, cortando su

área transversal en ubicaciones arbitrarias, mientras que en otras zonas dichas cerchas carecen del amarre necesario, generando desprendimientos de estas en diversos lugares del CER. Finalmente, en esta escuela se observan zonas donde no se ha perdido la cubierta tal como se puede ver en la Figura 25.



Figura 25. Estado de la cubierta del CER Palenque (ID 10)

4. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO FUERA DEL PLANO DE ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA

La mampostería simple es uno de los sistemas más utilizados para la construcción de Centros Educativos Rurales en Colombia. Cuando este tipo de estructuras se ve sometida a movimientos sísmicos moderados o severos, la mayoría de los muros experimenta inevitablemente una combinación de una respuesta en y fuera del plano. Los estudios realizados sobre los eventos sísmicos que han ocurrido en el pasado (Angiolilli et al., 2021, Mazza & Donnici, 2018, Sharma et al., 2021, entre otros) han permitido identificar que el tipo de falla más común en los muros de mampostería simple corresponde a la falla fuera del plano. Por esta razón, en este trabajo se incluye la implementación de una metodología desarrollada por Giordano et al. (2020) para evaluar la vulnerabilidad de forma cuantitativa de este tipo de estructuras y así poder utilizarla para calibrar la metodología de evaluación rápida basada en una inspección visual y utilizando parámetros globales.

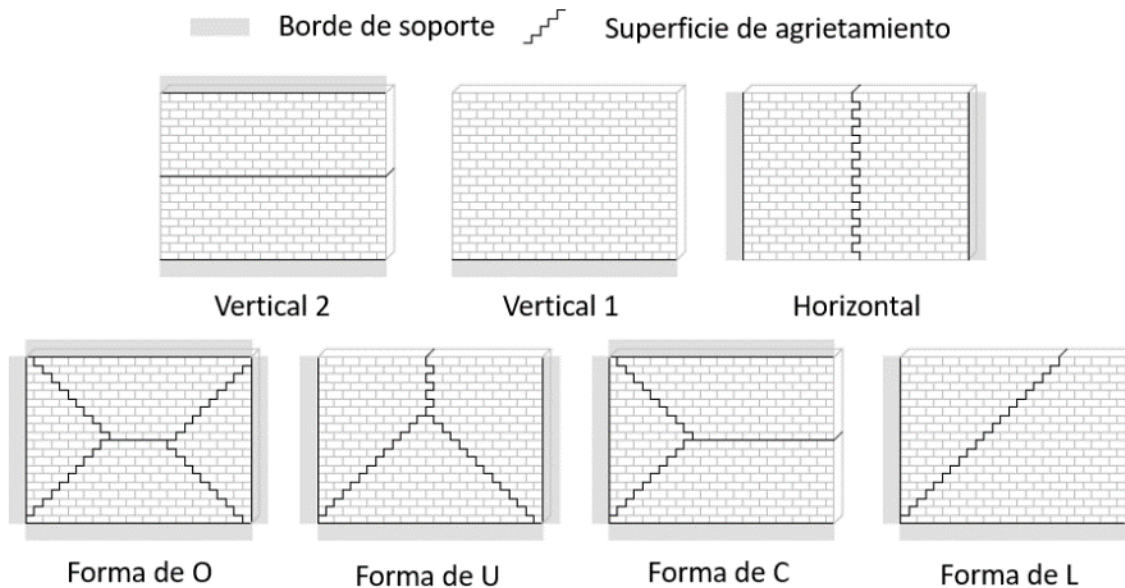


Figura 26. Tipos de falla fuera del plano en muros de mampostería no reforzada.

Fuente: Adaptada de Vaculik, (2012)

La falla fuera del plano de los muros en mampostería no reforzada cambia entre una y otra estructura, puesto que la forma de dichas fallas depende en gran medida de la ubicación de

los apoyos del muro. Tal como lo planteó Vaculik, (2012), pueden existir hasta siete (7) diferentes tipos de fallas fuera del plano, algunas con superficies de falla completamente horizontales que no mostrarán un patrón escalonado, otras con patrones verticales que por la naturaleza misma de la mampostería muestran un escalonamiento mínimo y otras con patrones mixtos que podrán incluir patrones escalonados diagonales, verticales y/o patrones totalmente horizontales, tal como se puede ver en la Figura 26.

A pesar de lo anterior, la mayor parte de las investigaciones se han concentrado en el comportamiento de la mampostería simple en el plano. Este trabajo se enfoca en evaluar la capacidad de respuesta fuera del plano de muros de mampostería simple y en definir los estados límites del sistema en términos de los desplazamientos fuera del plano y de los niveles de aceleración máxima del terreno asociadas a cada uno de estos estados.

La evaluación se enfoca en estructuras inicialmente de un solo nivel debido a que son las más comunes para las escuelas rurales y la misma se realiza con el fin de establecer aquellos parámetros que afectan la vulnerabilidad de la estructura y el grado en que ocurre esta afectación. Para realizar esta evaluación, se ha tomado como punto de partida, la metodología desarrollada por Giordano et al. (2020) para la evaluación de escuelas de mampostería no reforzada localizadas en Nepal. En esta investigación se estudió lo ocurrido tras el sismo de 2015 de Nepal, un país golpeado en múltiples ocasiones por sismos que, debido a la baja calidad de construcción que se maneja en la zona, ocasionan un impacto devastador, particularmente, este sismo del 2015 de Nepal provocó la muerte de cerca de 8.790 personas y 498.852 colapsos de edificaciones, con un aproximado de entre 6.000 y 8.200 escuelas afectadas, de las cuales más del 89% mostraba una tipología estructural de mampostería simple y una falla fuera del plano en sus muros (BBC News, 2015). Un detalle de lo ocurrido tras el suceso se puede ver en el reporte de Lizundia et al., (2021) y de Build Change Post-Disaster Reconnaissance Report, (2015).



Figura 27. Apariencia de falla fuera del plano. Fuente: Giordano et al. (2020)

En la Figura 27 se muestra la falla fuera del plano, la cual es uno de los patrones de falla más crítico en esta tipología estructural (en este caso, una falla tipo U), caracterizada por la ausencia de refuerzo en la mampostería y de una estructura capaz de garantizar el movimiento uniforme de la edificación, implicando esto que los muros que componen dicha edificación, ante la llegada de un sismo o fuerza horizontal, no cuentan con la capacidad de resistir los esfuerzos a los que se ven sometidos, evidenciando un comportamiento individual de cada muro ante la inexistencia de, al menos, una trabazón en las esquinas de la edificación, provocando la mencionada falla fuera del plano.

Giordano et al., (2020) propusieron una metodología para evaluar la vulnerabilidad sísmica de este tipo de estructuras mediante diversos planteamientos físico-matemáticos que permitían conocer la curva de capacidad del muro (para la capacidad fuera del plano, en este caso), la cual enfrenta la capacidad de desplazamiento del muro y capacidad de soportar una fuerza, permitiendo identificar el posible comportamiento del muro estudiado ante una sollicitación, tal como se puede ver en la Figura 28.

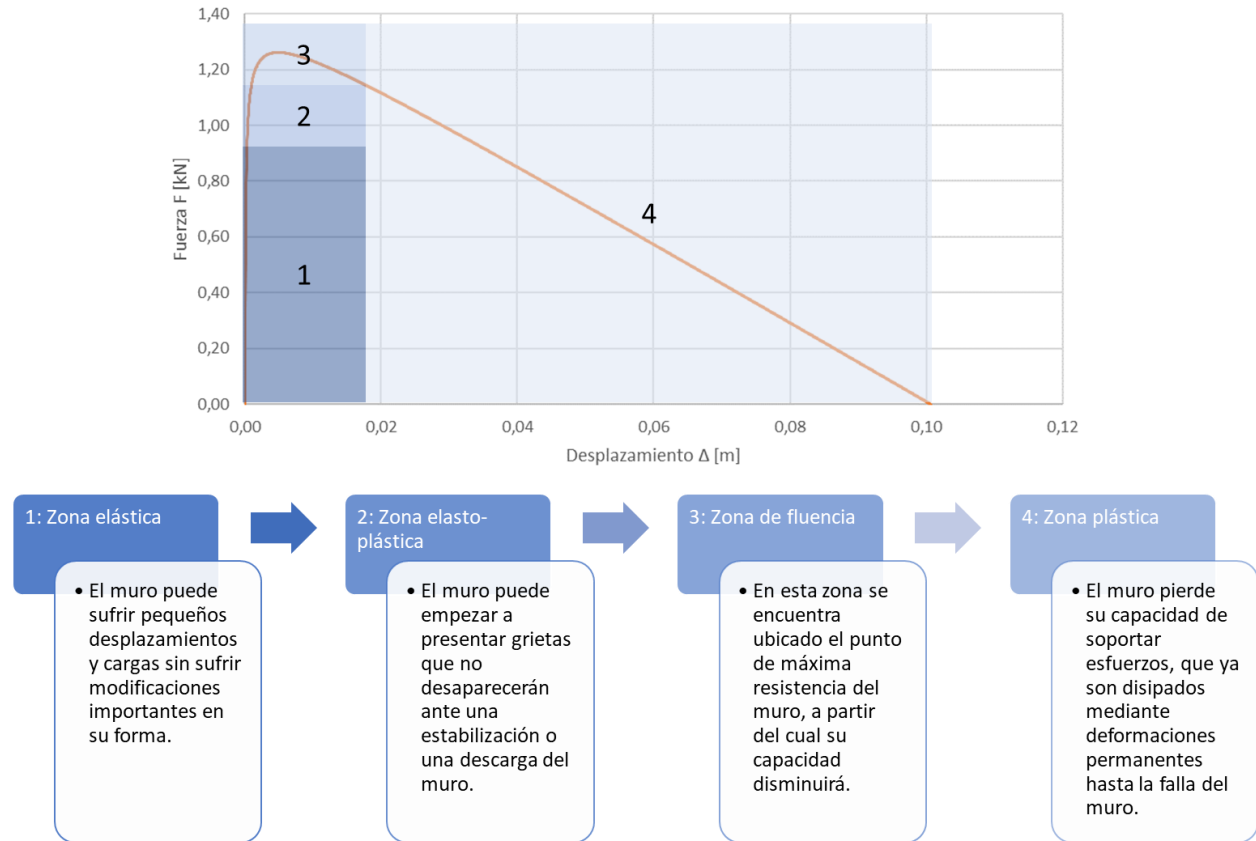


Figura 28. Zonas de la curva de capacidad del muro

Giordano et al., (2020) compararon su metodología con otras como la bilineal (Heyman, 1966), trilineal (Doherty et al., (2002) y Degli Abbati & Lagomarsino, (2017) y cuadrilineal (D'Ayala & Paganoni, (2011) y Ferreira et al., (2015)), tal y como se muestra en la Figura 29.

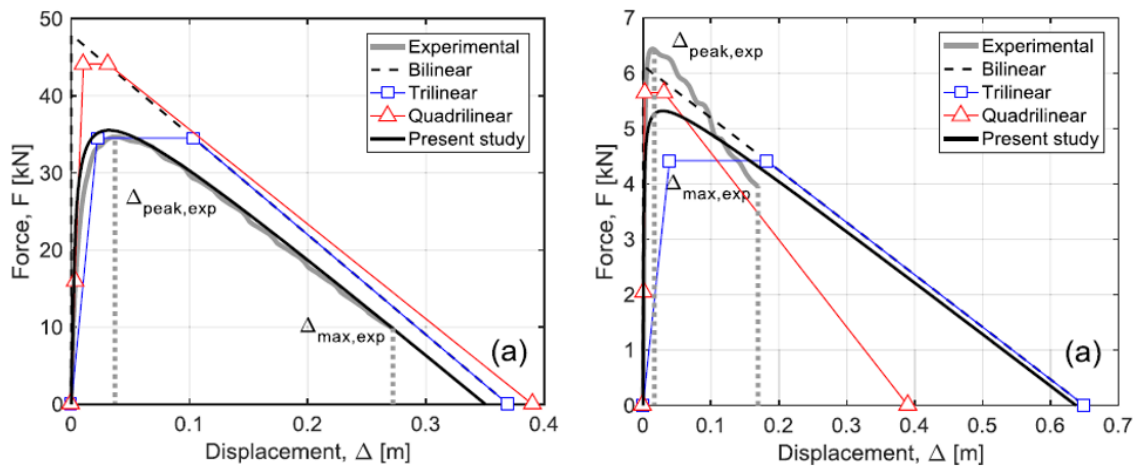


Figura 29. Comparación de metodología propuesta por Giordano et al. (2020).

Fuente: Adaptada de Giordano et al. (2020)

4.1. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

En este trabajo se utilizó la metodología propuesta por Giordano et al. (2020), la cual permite considerar los diferentes tipos de configuración de la edificación en cuanto a su construcción y características. Tal como se puede ver en la Figura 30, se cuenta con tres tipos de condiciones de frontera: a) Voladizo (Cantilever), que supone un cuerpo totalmente rígido, con la aplicación de una fuerza vertical en el centro del muro y un desplazamiento del mismo en su parte superior provocado por una fuerza horizontal, b) Pinned-Pinned, que supone un sistema de muro que mostrará desplazamiento en la mitad de su altura provocado por una fuerza horizontal con apoyos que permiten la rotación, y, por lo tanto, la aplicación directa en el centro del muro de la carga vertical y c) la condición Clamped-Clamped similar al anterior, pero con apoyos que no facilitan la rotación del muro provocando, por lo tanto, la aplicación de la fuerza vertical en el punto de apoyo del muro (no en el centro).

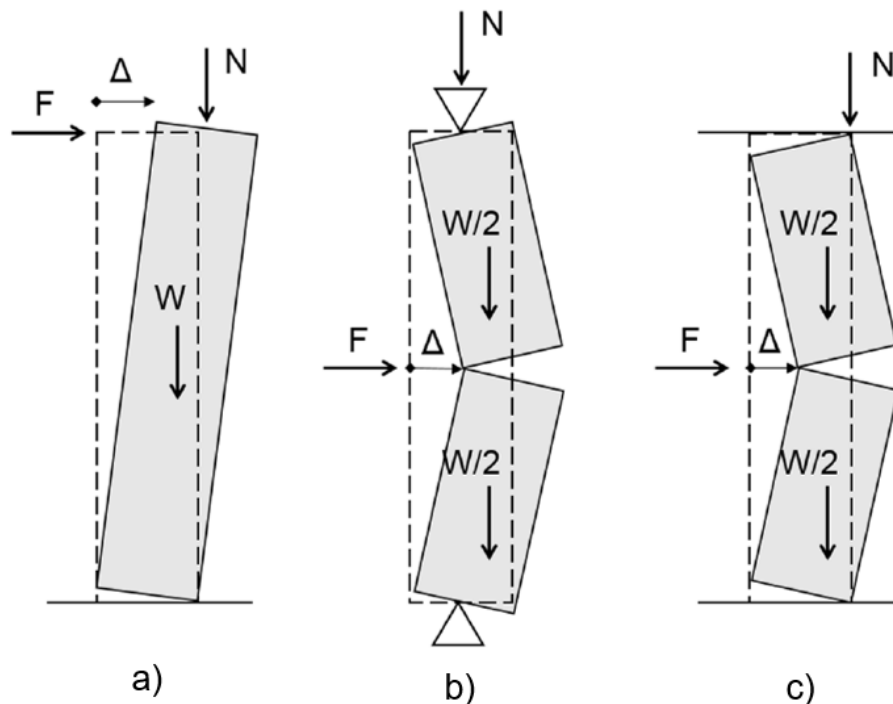


Figura 30. Hipótesis de condiciones de frontera de muros.

De izquierda a derecha, Cantilever, Pinned-Pinned y Clamped-Clamped

Fuente: Adaptada de Giordano et al. (2020)



Figura 31. Condiciones de muro de frontera encontradas en campo

De izquierda a derecha, Cantilever, Pinned-Pinned y Clamped-Clamped

Las cargas verticales mencionadas corresponden a cargas generadas por el propio peso del muro y a aquellas externas provenientes, por ejemplo, de muros de niveles superiores, cubiertas, entre otros. En la Figura 30 esta carga se ve representada como N y las fuerzas o cargas horizontales mencionadas se representan como F . En la Figura 31 se puede ver un ejemplo de estas condiciones de frontera, en donde, de izquierda a derecha, se puede apreciar un muro sin cargas significativas dispuestas sobre sí, un muro con la carga de la cubierta repartida a lo largo de este y un muro restringido por la carga impuesta por un nivel superior de la edificación, siendo respectivamente ejemplos de condiciones Cantilever, Pinned-Pinned y Clamped-Clamped.

En el estudio realizado por Giordano et al. (2020) se menciona también que los muros con carga vertical nula o no significativa son más vulnerables que aquellos que sí cuentan con la aplicación de dicha fuerza, esto debido a que la tensión generada en el sistema permite un mejor comportamiento del muro fuera del plano. Esta metodología cuenta, a diferencia de las otras presentes en el medio, con una consideración del comportamiento no lineal del muro dependiente de la sección transversal del mismo, lo cual implica que este acercamiento es aún más ceñido a los datos experimentales (Giordano et al. 2020). El modelo propuesto cuenta con los siguientes

supuestos y está basado en una versión modificada del método del Espectro de Capacidad (CSM por sus siglas en inglés):

- La falla fuera del plano es el modo de falla principal o predominante en las construcciones de mampostería tradicionales de Nepal (en el presente estudio se asumirá lo mismo para las estructuras de mampostería simple o semi confinada estudiadas de Colombia).
- La estructura no garantiza un diafragma rígido mediante la inclusión de trabazón en las esquinas o elementos horizontales, motivo por el cual cada uno de los muros de la edificación refleja un comportamiento individual.
- La vulnerabilidad de toda la edificación es gobernada por el muro con el peor comportamiento fuera del plano.

El modelo mecánico propuesto por Giordano et al. (2020) corresponde a un modelo de no linealidad concentrada, considerado por medio de una rótula plástica en la base y una longitud de plastificación (Figura 32). El modelo incluye las expresiones para calcular el diagrama momento-curvatura de manera discreta y asociado a varios estados límites. El modelo implementado por la metodología opera mediante las siguientes hipótesis:

- La respuesta fuera del plano de los muros está netamente gobernada por la flexión tal como sugieren los resultados experimentales presentados por Degli Abbatì & Lagomarsino (2017).
- Debido a la ubicación de la deformación no lineal generada por la flexión en el punto de momento máximo (base del muro), el muro es modelado como un cuerpo rígido conectado a su apoyo mediante una rótula plástica (non linear hinge).
- La relación momento rotación de la rótula plástica se calcula a partir de la gráfica momento curvatura de la sección crítica bajo la suposición de que los esfuerzos axiales se comportan de manera lineal en la flexión, es decir, se quedan en el plano, de tal manera que la rotación se calcula a partir de la sección crítica y de la longitud de integración.

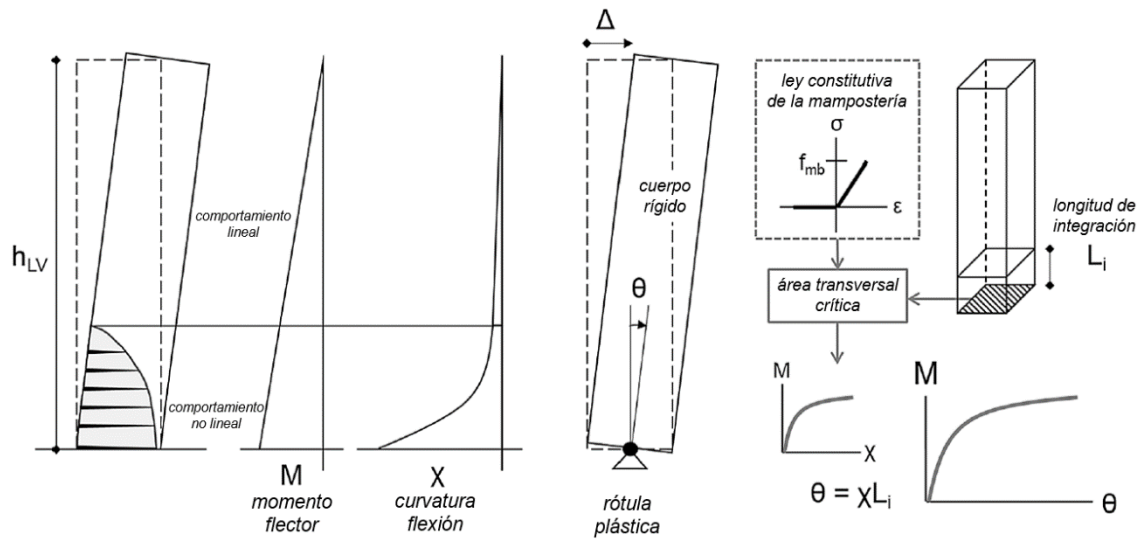


Figura 32. Hipótesis mecánicas del modelo.

Fuente: Adaptada de Giordano et al. (2020)

En la Figura 33 se muestra un diagrama de flujo del método propuesto. En el módulo A del diagrama se definen todas las características del muro. El primer paso de la metodología requiere de la definición de las condiciones de frontera del muro, las cuales, una vez definidas, permiten calcular la longitud de cortante del muro h_{LV} por medio de la Ecuación 1.

Tabla 3. Variables de entrada de modelo. Fuente: Giordano et al. (2020)

VARIABLE	DEFINICIÓN
α_h	Posición de fuerza resultante horizontal
B (m)	Longitud base muro
h (m)	Altura muro
t (m)	Espesor muro
N (kN)	Carga impuesta a muro de manera vertical en su tope
ϵ_m (kN/m ²)	Módulo de Elasticidad de la mampostería
f_{mb} (kN/m ²)	Límite de compresión de la mampostería
γ_m (kN/m ³)	Peso específico del muro
W (kN)	Peso propio muro
L_i (m)	Zona de integración para cálculo de rótula plástica
\bar{N} (kN)	Carga axial a la que se ve sometida la sección
h_{LV} (m)	Longitud de cortante del muro
χ_{cr}	Curvatura de agrietamiento
χ_{lim}	Curvatura límite
M_e	Masa efectiva del sistema de 1GDL
Δ_e	Desplazamiento efectivo del sistema de 1GDL

Un resumen de las variables fijas y de entrada requeridas por el modelo de Giordano et al. (2020) adaptado en el presente estudio es el que se puede ver en la Tabla 3.

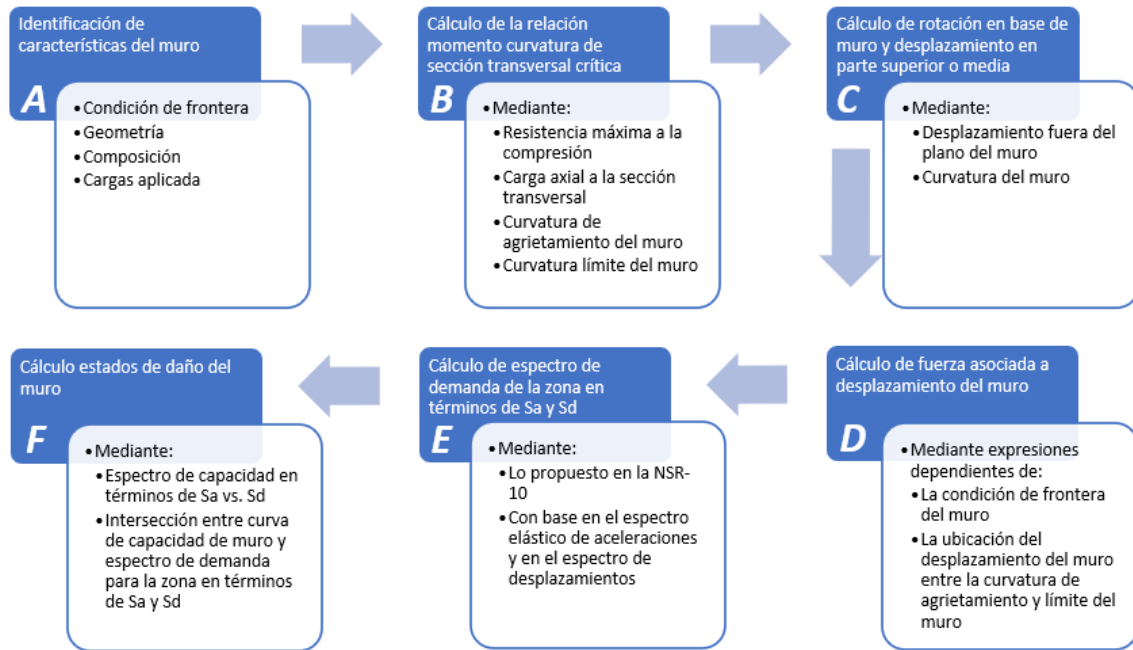


Figura 33. Diagrama de flujo del método propuesto por Giordano et al. (2020)

$$\left\{ \begin{array}{l} h_{LV} = h; \text{ Cantilever} \\ h_{LV} = \frac{h}{2}; \text{ Pinned - Pinned} \\ h_{LV} = \frac{h}{4}; \text{ Clamped - Clamped} \end{array} \right.$$

Ecuación 1.

En el módulo B, se calcula el diagrama momento-curvatura de la sección crítica, la cual corresponde a la de la base del muro. Para ello, es necesario definir la longitud de integración L_i mediante la siguiente expresión simplificada (Ecuación 2).

$$L_i = 0,25h_{LV}$$

Ecuación 2.

Una vez definida la longitud de integración se procede a calcular la relación momento-curvatura de la sección transversal crítica del muro por medio de las expresiones que se muestran en la Ecuación 3.

$$M = \begin{cases} \frac{1}{12} E_m B t^3 \chi; & \chi \leq \chi_{cr} \\ \bar{N} \left(\frac{t}{2} - \sqrt{\frac{2\bar{N}}{9E_m B \chi}} \right); & \chi_{cr} \leq \chi \leq \chi_{lim} \end{cases}$$

Ecuación 3.

Donde f_{mb} es la resistencia máxima a la compresión, \bar{N} es la carga axial de la sección transversal del muro (Ecuación 4), χ_{cr} es la curvatura de agrietamiento del muro (Ecuación 5) y χ_{lim} es la curvatura límite del muro (Ecuación 6).

$$\bar{N} = \begin{cases} W + N; & \text{Cantilever} \\ W + \frac{N}{2}; & \text{Pinned - Pinned y Clamped - Clamped} \end{cases}$$

Ecuación 4.

$$\chi_{cr} = \frac{2\bar{N}}{E_m B t^2}$$

Ecuación 5.

$$\chi_{lim} = \frac{f_{mb}^2 B}{2E_m \bar{N}}$$

Ecuación 6.

En el módulo C, se obtiene el desplazamiento en la parte superior o media del muro a partir de la rotación en la base. Mediante el diagrama momento-curvatura y suponiendo una distribución de curvatura a lo largo de la altura del muro se establece, por medio de la Ecuación 7, una relación entre el desplazamiento fuera del plano del muro Δ , y la curvatura, χ , del muro estudiado.

$$\begin{aligned} \theta &= \chi L_i \\ \Delta &= \theta h_{LV} \\ \chi &= \frac{\Delta}{L_i h_{LV}} \end{aligned}$$

Ecuación 7.

En el módulo D, Giordano et al. (2020), proponen una serie de expresiones para calcular la fuerza asociada al desplazamiento hallado anteriormente según la condición de frontera y la

curvatura dada para dicho desplazamiento. En la Ecuación 8, en la Ecuación 9 y en la Ecuación 10, se presenta un conjunto de expresiones que permiten obtener la capacidad fuera del plano del muro en términos de fuerza dependiendo de la condición de frontera. Es importante recordar que α_h es una magnitud que puede tomar valores de 0 a 1 y dicta la posición relativa de la fuerza horizontal resultante que experimenta el muro estudiado, y, según lo propuesto por Giordano et al., (2020) haría que la fuerza se ubique en el extremo superior del muro para la condición de frontera Cantilever y en la mitad del muro para las otras dos condiciones de frontera estudiadas (Pinned-Pinned y Clamped-Clamped), implicando que dicha magnitud α_h tome valor de 1 y de 0,5, respectivamente, en los casos mencionados.

$$F = \frac{1}{h_{LV}\alpha_h} \left(M - \frac{W\Delta}{2} - N\Delta \right); \text{ Expresión general para Cantilever}$$

$$F = \frac{1}{h_{LV}\alpha_h} \left(\frac{1}{12} E_m B t^3 \frac{\Delta}{L_i h_{LV}} - \frac{W\Delta}{2} - N\Delta \right); \text{ para } \Delta \leq L_i h_{LV} \chi_{cr}$$

$$F = \frac{1}{h_{LV}\alpha_h} \left[(N + W) \left(\frac{t}{2} - \sqrt{\frac{2L_i t (N + W)}{9E_m B \Delta}} \right) - \frac{W\Delta}{2} - N\Delta \right]; \text{ para } L_i h_{LV} \chi_{cr} \leq \Delta \leq L_i h_{LV} \chi_{lim}$$

Ecuación 8.

$$F = \frac{2}{h_{LV}\alpha_h} \left(M - \frac{W\Delta}{2} - N\Delta \right); \text{ Expresión general para Pinned – Pinned}$$

$$F = \frac{2}{h_{LV}\alpha_h} \left(\frac{1}{12} E_m B t^3 \frac{\Delta}{L_i h_{LV}} - \frac{W\Delta}{2} - N\Delta \right); \text{ para } \Delta \leq L_i h_{LV} \chi_{cr}$$

$$F = \frac{2}{h_{LV}\alpha_h} \left[\left(N + \frac{W}{2} \right) \left(\frac{t}{2} - \sqrt{\frac{2L_i t (N + W/2)}{9E_m B \Delta}} \right) - \frac{W\Delta}{2} - N\Delta \right]; \text{ para } L_i h_{LV} \chi_{cr} \leq \Delta \leq L_i h_{LV} \chi_{lim}$$

Ecuación 9.

$$F = \frac{2}{h_{LV}\alpha_h} \left(M - \frac{W\Delta}{4} - \frac{N\Delta}{2} \right); \text{ Expresión general para Clamped – Clamped}$$

$$F = \frac{2}{h_{LV}\alpha_h} \left(\frac{1}{12} E_m B t^3 \frac{\Delta}{L_i h_{LV}} - \frac{W\Delta}{4} - \frac{N\Delta}{2} \right); \text{ para } \Delta \leq L_i h_{LV} \chi_{cr}$$

$$F = \frac{2}{h_{LV}\alpha_h} \left[\left(N + \frac{W}{2} \right) \left(\frac{t}{2} - \sqrt{\frac{4L_i t (N + W/2)}{9E_m B \Delta}} \right) - \frac{W\Delta}{4} - \frac{N\Delta}{2} \right]; \text{ para } L_i h_{LV} \chi_{cr} \leq \Delta \leq L_i h_{LV} \chi_{lim}$$

Ecuación 10.

Finalmente, en el módulo E y F, se calcula el espectro de capacidad del muro fuera del plano y se identifican los estados de daño. Para ello, se hace uso del método CSM. Se utiliza como medida de intensidad la aceleración pico del suelo o PGA por sus siglas en inglés, necesaria para producir cada uno de los estados de daño planteados en el estudio (Tabla 4). Esta medida de intensidad (PGA) resulta muy conveniente para generar esquemas rápidos de evaluación y priorización debido a que la mayoría de los países tienen clasificado el nivel de amenaza sísmica en términos de este parámetro. En ese sentido, es posible identificar rápidamente el umbral correspondiente de PGA para generar un cierto nivel de daño.

Tabla 4. Estados de daño del muro. Fuente: Giordano et al. (2020)

ESTADO DE DAÑO (DS)	DEFINICIÓN
DS1	Daño leve asociado al 70% de la fuerza horizontal máxima aplicada al muro
DS2	Daño moderado asociado al desplazamiento máximo del muro
DS3	Daño severo asociado al 25% del desplazamiento último del muro
DS4	Daño cercano al colapso asociado al 40% del desplazamiento último del muro

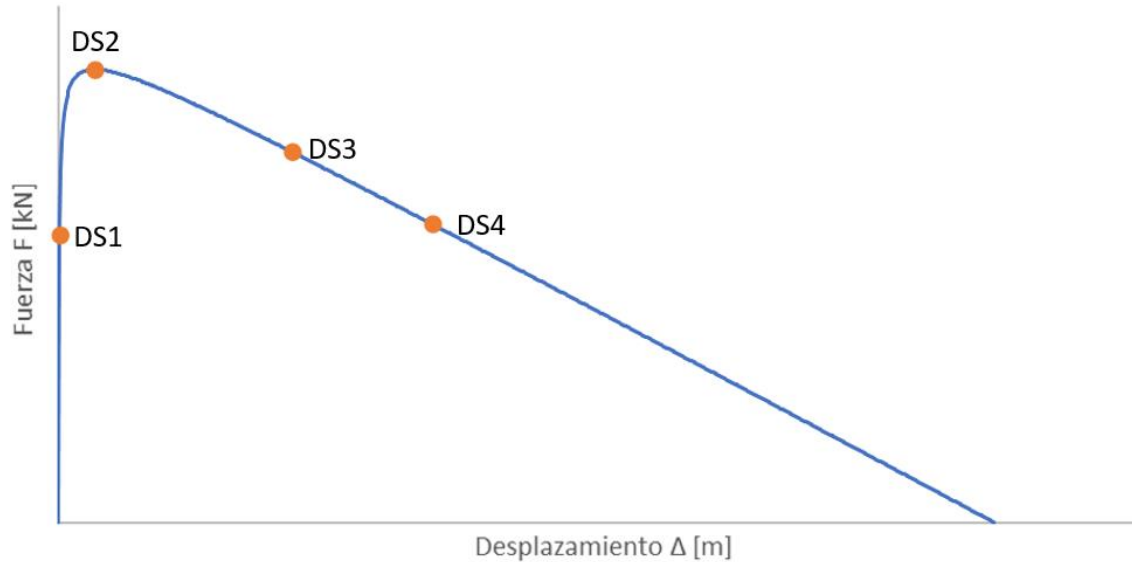


Figura 34. Esquema típico estados de daño en curva de capacidad del muro

El método del espectro de capacidad requiere para su uso la implementación de un espectro en formato S_a vs. S_d , motivo por el cual el desplazamiento y la fuerza a la que se ve sometido el muro debe estar en estos mismos términos. Esto se logra aplicando la Ecuación 11,

donde M_e es la masa efectiva del sistema de 1 grado de libertad y Δ_e es el desplazamiento efectivo del sistema de 1 grado de libertad.

$$S_a = \frac{F}{M_e}$$

$$S_d = \Delta \Delta_e$$

Ecuación 11.

El cálculo de la masa efectiva del sistema de 1 grado de libertad planteado por Giordano et al., (2020) consiste en la sumatoria al cuadrado del producto de la masa por el desplazamiento del muro estudiado en un modelo de elementos finitos dividida por la sumatoria del producto entre la masa y el cuadrado del desplazamiento del muro estudiado en un modelo de elementos finitos. Para el presente estudio, con el fin de no acudir a un modelo de elementos finitos en cada ocasión, se procedió a realizar el cálculo de dicha masa según lo planteado por Doherty et al., (2002) y lo estudiado por Sorrentino et al., (2017) en donde dicha magnitud para un modelo aproximado puede tomar un valor igual a 3/4 de la masa del muro estudiado, por lo tanto la masa efectiva del sistema de 1 grado de libertad es la que se puede ver en la Ecuación 12.

$$M_e = \frac{3}{4}M$$

Ecuación 12.

De igual manera el cálculo del desplazamiento efectivo del sistema de 1 grado de libertad planteado por Giordano et al., (2020) consiste en la sumatoria del producto entre la masa y el cuadrado del desplazamiento del muro estudiado en un modelo de elementos finitos dividida por la sumatoria del producto entre la masa y el desplazamiento del muro estudiado en un modelo de elementos finitos. Sin embargo, para el presente estudio se utiliza un acercamiento dado por el factor de amplificación de deflexión (Deflection Amplification Factor, o C_d) planteado en ASCE, (2016), para un muros portantes de mampostería, de 1,5, resultando en la expresión que se puede ver en la Ecuación 13.

$$\Delta_e = \frac{1}{1,5}$$

Ecuación 13.

Finalmente, para determinar el PGA necesario para alcanzar cada estado de daño se procede a hallar el punto de intersección entre el espectro de demanda adaptado reducido por un porcentaje y la gráfica de fuerza contra desplazamiento en términos de S_a y S_d del muro estudiado, leyendo, finalmente, el valor del PGA en la intercepción del espectro de demanda reducido con el eje de las ordenadas para cada estado de daño (Figura 35). El porcentaje de reducción mencionado se obtiene mediante una iteración entre el producto de todos los valores de S_a y S_d del espectro de demanda y un porcentaje propuesto que se irá reduciendo paso a paso hasta que dichos valores de S_a y S_d permitan evidenciar una intersección entre este espectro de demanda propuesto y el espectro de capacidad del muro estudiado, como se puede ver en la Figura 35.

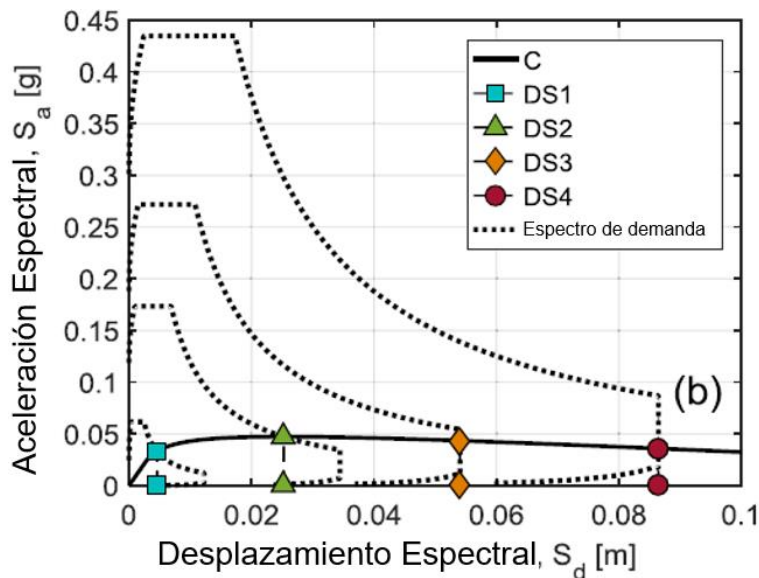


Figura 35. Espectro de demanda reducido y estados de daño. Fuente: Giordano et al. (2020)

Adicional a lo anterior, se debe tener en cuenta que, para evaluar adecuadamente los diferentes muros, es preciso considerar únicamente los tramos de muro sin vacíos, por esto fue necesario considerar la solución que proponen los autores para los vacíos que aparecen en los

diferentes muros por acción de ventanas, puertas u otros elementos arquitectónicos. Esta solución consiste en el uso de una “división” de los muros en los puntos en que aparecen estos vacíos, resultando en muros con longitudes cortas ubicados a ambos o a un lado de los vacíos de un muro general, tal como se puede ver en la Figura 36 en donde lo achurado en colores son los muros que efectivamente serán evaluados (estos muros también son conocidos como “Piers”). Esta solución implica, por lo tanto, la omisión de porciones de muro ubicadas sobre o bajo elementos arquitectónicos.

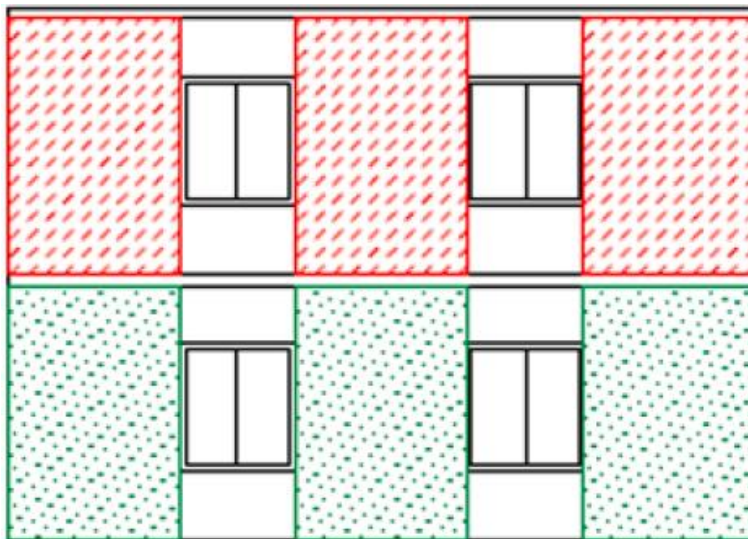


Figura 36. Solución para modelado de vacíos en muros propuesta por Giordano et al. (2020).

Fuente: Adaptada de Giordano et al. (2020)

4.2. APLICACIÓN Y ADAPTACIÓN DE LA METODOLOGÍA

A partir de los datos encontrados en la visita de campo realizada en el municipio de Jericó, Antioquia, mencionada en el Capítulo 3, fue posible adaptar esta metodología a las condiciones constructivas típicas del departamento de Antioquia, en particular, a la mampostería simple y semi confinada. Inicialmente, se eligió el centro Educativo la Pradera de la base de datos de Centros Educativos Rurales del municipio de Jericó. Se aplicó la metodología para uno de los muros de culata o de la fachada lateral de la escuela. El muro tiene una longitud B igual a 5,25 m dividida por una ventana, lo cual implica que, según la propuesta de Giordano et al., (2020)

(ver Figura 36), este muro debe ser dividido y serán aptas para el estudio las longitudes de muro sin presencia de vacíos, resultando en dos muros de 1,8 m de longitud. Se cuenta con una altura h igual a 2,4 m, y un espesor t de 0,15 m. En la Figura 37 se muestra la división que se realizó del muro de culata. La carga axial se estimó con base en la carga típica de cubierta de tejas de barro para un valor igual a 1,8 kN. La existencia de vigas de amarre implicaría una condición Pinned-Pinned para el sistema estudiado. La escuela seleccionada se muestra en la Figura 37 y sobre ésta se identifican las porciones de muro analizado en color verde.



Figura 37. Escuela y muro seleccionado para aplicar la metodología.

Las propiedades como el peso específico, el peso propio, el límite de compresión y el módulo de Elasticidad se tomaron del estudio realizado por Baena Urrea, (2019). El peso específico del muro γ_m es igual a $10,5 \text{ kN/m}^3$, el peso propio del muro W es igual a 6,8 kN, la resistencia a la compresión de la mampostería utilizada en el muro estudiado es igual a 7 MPa y el módulo de Elasticidad de la mampostería que compone el muro estudiado es igual 10.000 MPa. Debido a la condición de semi confinamiento dada por la viga de amarre que se pudo ver en la Figura 37, la hipótesis de condición de frontera utilizada en este ejemplo práctico será la de

muro Pinned-Pinned, tal como se había mencionado previamente, motivo por el cual la posición de la fuerza horizontal resultante α_h es igual a 0,5.

A partir de los datos anteriores y de las ecuaciones mostradas en el Capítulo 4 es posible determinar uno a uno el valor de las diferentes variables necesarias para el modelo de la siguiente manera.

- La carga axial a la que se ve sometida la sección crítica del muro estudiado es igual a la suma del peso propio del muro y de la mitad de la fuerza ejercida sobre el mismo por acción de elementos externos como cubiertas u otros niveles, en este caso, dicho valor \bar{N} es igual a 7,7 kN para la condición de frontera en Pinned-Pinned.

$$\bar{N} = N + W/2 = N + \gamma_m/2 (B * h * t) = 1,8 \text{ kN} + 10,5 \text{ kN/m}^3 / 2 (1,8 \text{ m} * 2,4 \text{ m} * 0,15 \text{ m}) = 7,7 \text{ kN}$$

- La longitud de cortante del muro es una variable dependiente de la altura del muro y de la condición de frontera identificada en el mismo, en este caso es posible determinar dicho valor como igual a 1,2 m debido a la condición de frontera de muro Pinned-Pinned (Ecuación 1).

$$h_{LV} = h/2 = 2,4 \text{ m} / 2 = 1,2 \text{ m}$$

- La zona o longitud de integración dependerá únicamente de la longitud de cortante del muro, y será, para todos los casos, igual al 25% de dicha longitud de cortante del muro, 0.3 m en esta ocasión (Ecuación 2).

$$L_i = 0,25h_{LV} = 0,25(1,2 \text{ m}) = 0,3 \text{ m}$$

- Los valores de curvatura asociados al estado de agrietamiento y límite del muro, dependientes únicamente de la composición y forma del muro son iguales, en este caso, a $0,000038 \text{ m}^{-1}$ y a $0,572430 \text{ m}^{-1}$, respectivamente (Ecuación 5 y Ecuación 6).

$$\chi_{cr} = \frac{2\bar{N}}{E_m B t^2} = \frac{2(7,7 \text{ kN})}{10000 \text{ MPa} * 1,8 \text{ m} * (0,15\text{m})^2} = 0,000038 \text{ m}^{-1}$$

$$\chi_{lim} = \frac{f_{mb}^2 B}{2E_m \bar{N}} = \frac{(7 \text{ MPa})^2 * 1,8 \text{ m}}{2 * 10000 \text{ MPa} * 7.7 \text{ kN}} = 0,572430 \text{ m}^{-1}$$

- La masa y desplazamiento efectivo del muro en un sistema de 1 grado de libertad son calculadas a partir de lo propuesto por Doherty et al., (2002) en donde la masa efectiva es igual a 3/4 de la masa total del sistema estudiado y a partir del factor de amplificación de deflexión planteado en ASCE, (2016) mediante el cual se establece que el desplazamiento efectivo es igual a 1/1,5, en este caso, dichos valores son iguales a 5,78 kN y a 0,67 m, respectivamente.

$$M_e = \frac{3}{4} \bar{N} = \frac{3}{4} 7,7 \text{ kN} = 5,78 \text{ kN}$$

$$\Delta_e = 1/1,5 = 0,67 \text{ m}$$

Nota: Las unidades implementadas en la masa equivalente son utilizadas con el fin de, posteriormente, calcular la aceleración Sa de capacidad del muro.

Tabla 5. Valores de entrada según promedio en campo. Fuente: Propia

VARIABLE	DEFINICIÓN	VALOR
αh	Posición de fuerza resultante horizontal	0,5
B [m]	Base muro	1,8
h [m]	Altura muro	2,4
t [m]	Espesor muro	0,15
N [kN]	Carga impuesta a muro	1,8
E_m [kN/m ²]	Módulo de Elasticidad de la mampostería	10000000
f_{mb} [kN/m ²]	Límite de compresión de la mampostería	7000
γ_m [kN/m ³]	Peso específico del muro	10,5
W [kN]	Peso propio muro	6,8
Li [m]	Zona de integración	0,3
\bar{N} [kN]	Carga axial de la sección	7,7
hLV [m]	Longitud de cortante del muro	1,2
χ_{cr} [m ⁻¹]	Curvatura de agrietamiento	3.80×10^{-5}
χ_{lim} [m ⁻¹]	Curvatura límite	0,572
Me [kN]	Masa efectiva del sistema de 1GDL	5,78
Δ_e [m]	Desplazamiento efectivo del sistema de 1GDL	0,67

Un resumen de estos valores vistos se puede apreciar en la Tabla 5. Con base en los valores de curvatura propuestos y en la Ecuación 7 se procede a realizar el cálculo de la rotación y del desplazamiento del muro para cada paso de la curvatura.

A partir de estos valores es posible calcular la fuerza horizontal a la cual se ve sometido el muro estudiado según la condición de frontera planteada o identificada, y según el valor del desplazamiento logrado en comparación con aquellos valores de desplazamiento asociados a la curvatura límite y a la curvatura de agrietamiento, siendo la Ecuación 8 la cual permite calcular dicha fuerza para la condición de frontera Cantilever, la Ecuación 9 para la condición de frontera Pinned – Pinned y la Ecuación 10 para la condición de frontera Clamped – Clamped. En este caso la mencionada Ecuación 9 será la utilizada. En la Figura 38 se muestra la curva de capacidad del muro seleccionado en términos de fuerza y desplazamiento.

También es posible, a partir de los datos anteriores, obtener el diagrama momento-curvatura para la sección crítica del muro en la base. Para ello, se utiliza la Ecuación 3 y se varía la curvatura desde 0 hasta el X_{lim} .

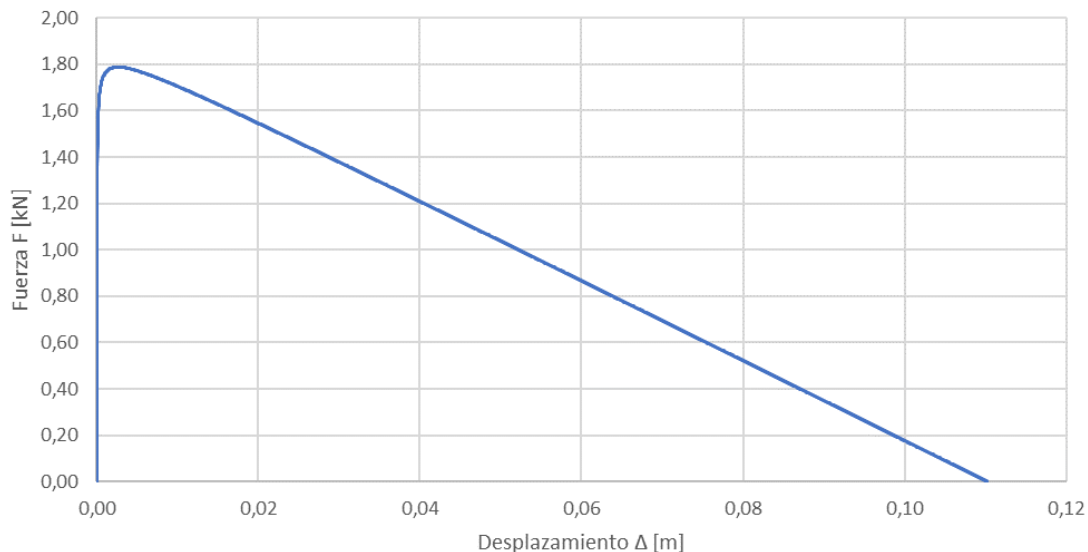


Figura 38. Curva de capacidad del muro seleccionado.

En la Figura 39 se muestra el diagrama momento-curvatura para el muro seleccionado. Luego se calcula, a partir de la curva de capacidad del muro estudiado, el espectro de capacidad

del muro por medio de la Ecuación 11.y se superpone con el espectro de demanda propuesto por Giordano et al., (2020) adaptado para el presente estudio (ver Figura 40).

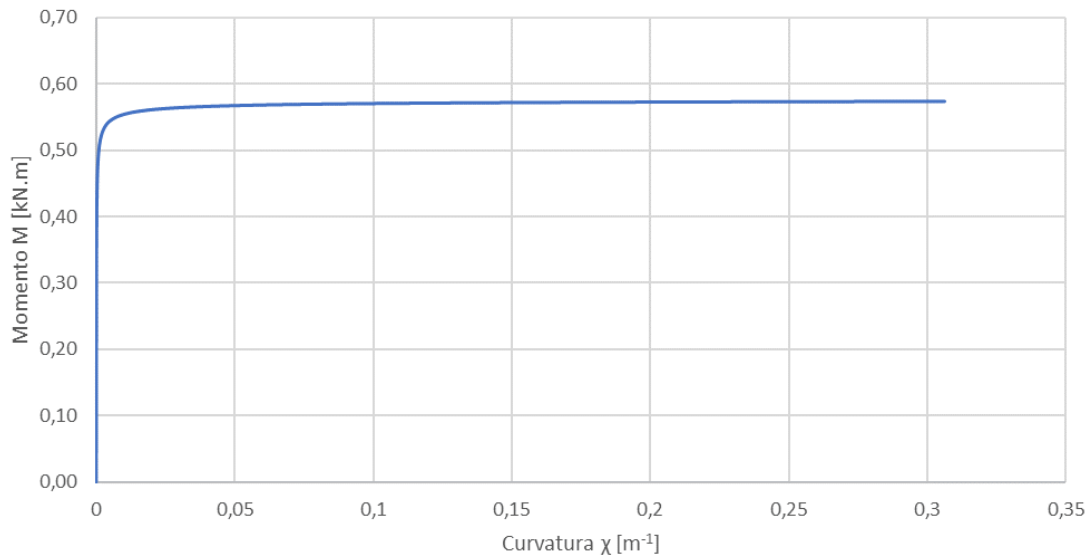


Figura 39. Diagrama momento-curvatura del muro seleccionado.

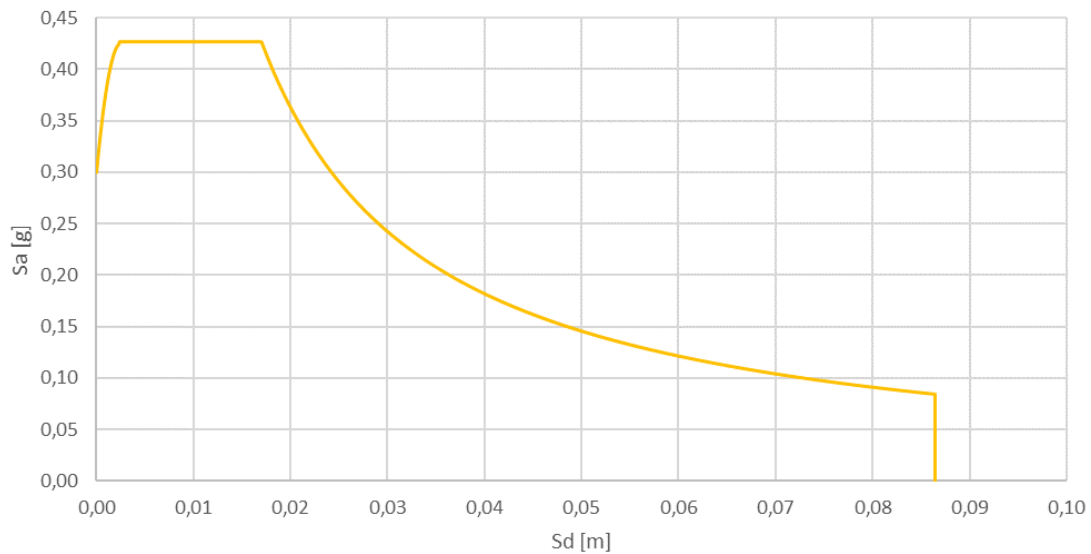


Figura 40. Espectro de demanda propuesto por Giordano et al., (2020) adaptado

Finalmente, interceptando los valores de la curva de capacidad del muro estudiado y del espectro de demanda mencionado, en términos de S_a y S_d , es posible, mediante el escalamiento del espectro de demanda, hallar un PGA requerido para cada estado de daño, esto se realiza,

tal como se había mencionado previamente, mediante una iteración en la reducción de los valores de S_a y S_d del espectro de demanda de la zona hasta llegar a un espectro de demanda tal que se intercepte una vez con la curva de capacidad del muro en los valores determinados para cada estado de daño (ver Figura 41).

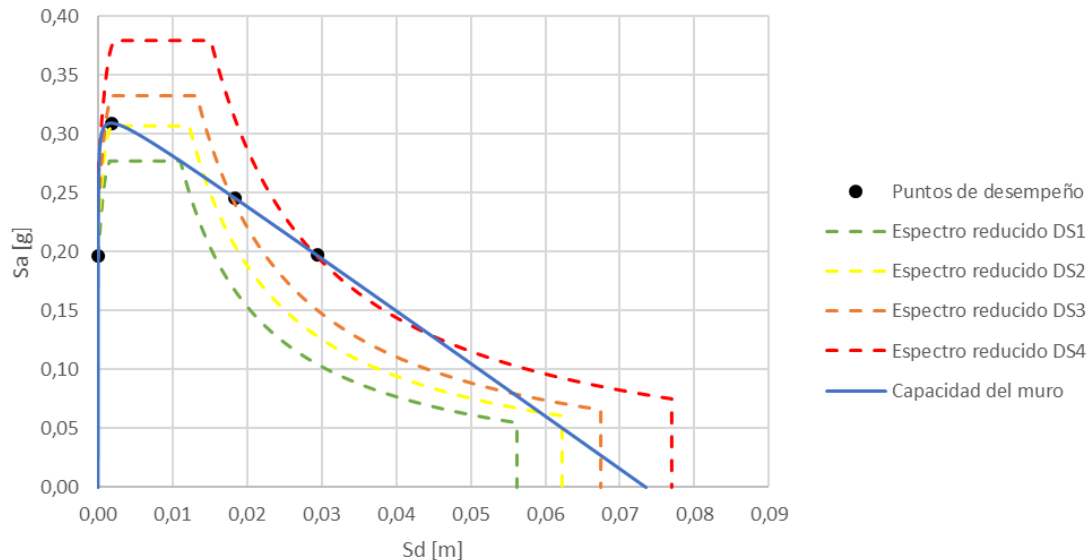


Figura 41. Intercepciones entre capacidad del muro y Espectro de demanda para el muro estudiado.

Una vez se logra determinar el porcentaje de reducción de los valores S_a y S_d del espectro de demanda para la zona, se lee el valor de S_a para un S_d igual a cero en el espectro de demanda, equivalente al valor de PGA que corresponde al umbral para cada estado de daño. Estos valores obtenidos de PGA serán comparados con eventos sísmicos históricos de la zona para así determinar si las características del muro reflejan una vulnerabilidad inherente al Centro Educativo Rural estudiado. El resultado de lo anteriormente planteado y calculado se puede apreciar en la Tabla 6 y en la Figura 41.

Tabla 6. Resultado de cálculo con valores promedio de muro encontrados en campo

ESTADO DE DAÑO	DESPLAZAMIENTO (Δ) [cm]	FUERZA (F) [kN]	S_d [m]	S_a [g]	PGA REQUERIDO
DS1	0,00004	1,133	0,00002	0,196	0,195
DS2	0,00266	1,788	0,00178	0,309	0,216
DS3	0,02754	1,420	0,01836	0,246	0,234
DS4	0,04406	1,139	0,02938	0,197	0,267

El ejercicio planteado anteriormente se realizó gracias al software Excel y al módulo de Visual Basic integrado, mediante los cuales fue posible hallar los estados de daño y, posteriormente, gracias a un algoritmo iterativo, hallar los PGA requeridos para cada uno de los estados de daño, iterando reducciones del espectro de demanda hasta su intersección con la curva de capacidad del muro estudiado.

4.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO ADAPTADO

A partir del cálculo anterior, y con el fin de ejecutar un análisis de sensibilidad con las variables de entrada del modelo, se procedió a realizar el cálculo con diferentes rangos de valores propuestos para cada una de las variables del muro y la carga impuesta. Los valores fueron seleccionados con base en la información recopilada del trabajo de campo en el municipio de Jericó.

Tabla 7. Valores de entrada para hallar umbrales de características del muro

No.	ALTURA MURO h [m]	BASE MURO B [m]	ESPESOR MURO t [m]	CARGA IMPUESTA A MURO N [kN]
1	5,25	2,2	0,15	5,5
2	5,25	2,4	0,15	5,5
3	5,25	2,6	0,15	5,5
4	5,25	2,8	0,15	5,5
5	5,25	3	0,15	5,5
6	5,25	3,2	0,15	5,5
7	5,25	3,4	0,15	5,5
8	5,25	3,6	0,15	5,5
9	5,25	3,8	0,15	5,5
10	5,25	4	0,15	5,5
11	3,8	2,4	0,15	5,5
12	5	2,4	0,15	5,5
13	10	2,4	0,15	5,5
14	15	2,4	0,15	5,5
15	20	2,4	0,15	5,5
16	5,25	2,4	0,08	5,5
17	5,25	2,4	0,1	5,5
18	5,25	2,4	0,12	5,5
19	5,25	2,4	0,15	5,5
20	5,25	2,4	0,2	5,5
21	5,25	2,4	0,15	0
22	5,25	2,4	0,15	2,5

No.	ALTURA MURO h [m]	BASE MURO B [m]	ESPESOR MURO t [m]	CARGA IMPUESTA A MURO N [kN]
23	5,25	2,4	0,15	5
24	5,25	2,4	0,15	7,5
25	5,25	2,4	0,15	10
26	5,25	2,4	0,15	12,5
27	5,25	2,4	0,15	15
28	5,25	2,4	0,15	17,5
29	5,25	2,4	0,15	20
30	5,25	2,4	0,15	22,5
31	5,25	2,4	0,15	25

Tabla 8. PGA para cada estado de daño según valores de entrada para hallar umbrales

No.	PGA DS1	PGA DS2	PGA DS3	PGA DS4
1	0,219	0,24	0,243	0,273
2	0,195	0,216	0,234	0,264
3	0,174	0,198	0,225	0,255
4	0,156	0,183	0,219	0,249
5	0,141	0,171	0,213	0,24
6	0,129	0,159	0,207	0,234
7	0,117	0,147	0,201	0,228
8	0,105	0,138	0,198	0,222
9	0,096	0,129	0,192	0,219
10	0,09	0,123	0,189	0,213
11	0,192	0,216	0,225	0,255
12	0,195	0,216	0,231	0,264
13	0,198	0,216	0,249	0,282
14	0,201	0,216	0,255	0,291
15	0,201	0,219	0,261	0,294
16	0,099	0,108	0,111	0,126
17	0,102	0,138	0,147	0,165
18	0,138	0,171	0,18	0,204
19	0,195	0,216	0,234	0,264
20	0,288	0,297	0,324	0,36
21	0,204	0,219	0,273	0,309
22	0,198	0,216	0,252	0,285
23	0,195	0,216	0,237	0,267
24	0,192	0,216	0,225	0,255
25	0,189	0,216	0,216	0,243
26	0,183	0,207	0,207	0,234
27	0,18	0,201	0,201	0,228
28	0,177	0,195	0,195	0,222
29	0,174	0,192	0,192	0,216

No.	PGA DS1	PGA DS2	PGA DS3	PGA DS4
30	0,171	0,189	0,189	0,213
31	0,168	0,183	0,183	0,21

En la Tabla 7 se pueden apreciar los valores de entrada para este análisis de sensibilidad planteado y en la Tabla 8 el resultado de este.

Con base en este análisis, fue posible identificar los valores de cada variable a partir de los cuales la vulnerabilidad del muro estudiado se ve mayormente afectada en los diferentes estados de daño, siendo la propuesta del presente estudio el enfocar dicho análisis con el estado de daño 3 (DS3) asociado al 25% del desplazamiento último del muro para así determinar en la metodología para el cálculo de la vulnerabilidad propuesto en este estudio los rangos en los cuales se debe considerar un aumento en el valor calculado de la vulnerabilidad para el muro estudiado, es decir, con base en la Tabla 7 y según lo visto en la Tabla 8, es posible identificar las características propias del muro que aumentan la vulnerabilidad del muro.

A continuación, se analizan, para diferentes variables y los valores asociados, los sismos históricos contemplados en este estudio para el Municipio de Jericó, correspondientes a los eventos del 20 de diciembre de 1961, del 30 de julio de 1962, del 3 de abril de 1973, del 30 de agosto de 1973 y del 23 de noviembre de 1979 (Servicio Geológico Colombiano, 2016) con unas intensidades medidas en sitio con la escala de intensidad de Mercalli modificada y unas medidas de daño en sitio que se pueden apreciar en la Tabla 9. Los eventos sísmicos que no registran daños en sitio no fueron tenidos en cuenta para el análisis del presente estudio.

En particular, los sismos de 1961 y 1979 fueron acontecimientos de gran impacto (ver Figura 42). Por su parte el sismo de 1961 dejó más de veinte víctimas y más de cien lesionados. Afectó a más de sesenta municipios de Antioquia, Caldas, Risaralda, Valle del Cauca y Quindío y se percibió en otros departamentos como Cundinamarca, Chocó, Meta, Nariño, entre otros. En Antioquia este evento sísmico afectó en mayor medida al municipio de Sonsón, en donde el saldo

de viviendas afectadas es de más de doscientas y en donde también edificaciones de gran importancia como Iglesias y colegios fueron dañadas (Servicio Geológico Colombiano, 2023).

El sismo del 23 de noviembre de 1979 dejó un saldo de más de cincuenta fallecidos y de más de quinientos lesionados en los departamentos de Caldas, Risaralda, Quindío, Antioquia, Valle del Cauca, Chocó, Cauca y Tolima. Solo en el departamento de Antioquia se registró la avería de más de mil edificaciones y la completa destrucción de alrededor de cuatrocientas (Servicio Geológico Colombiano, 2023).

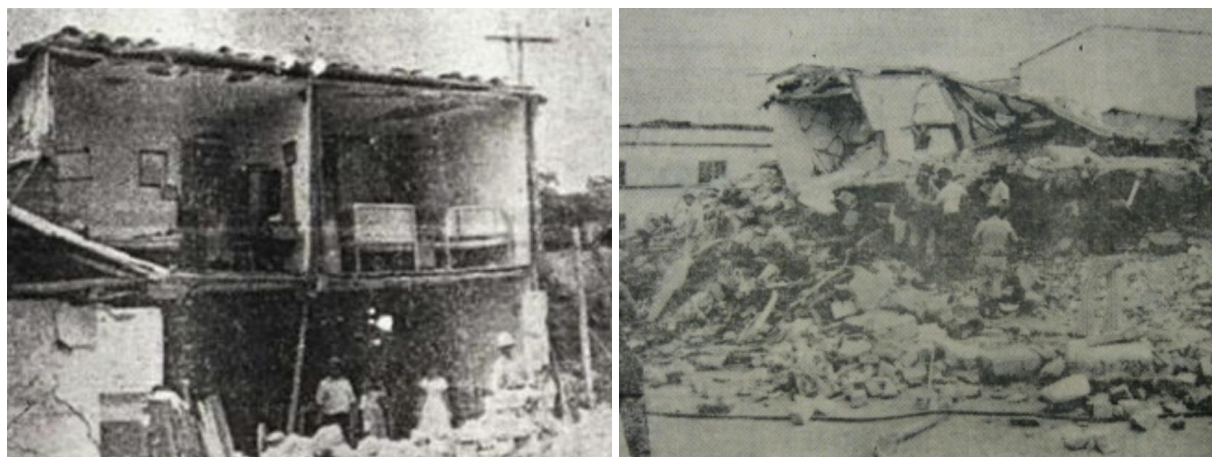


Figura 42. Afectaciones eventos sísmicos de 1961 y de 1979

Fuente: Adaptada de (Servicio Geológico Colombiano, 2023)

Se tiene registro de que en el municipio de Jericó las edificaciones sufrieron daños leves y moderados en ambos eventos sísmicos mencionados (Servicio Geológico Colombiano, 2023), por lo tanto, estos son representativos para el presente estudio.

Tabla 9. Eventos sísmicos históricos de Jericó

Epicentro	Fecha del sismo	Profundidad [km]	Intensidad en sitio (MM)	PGA [g]	Daños en sitio
Eje cafetero	1961/12/20	163	7	0,18	Moderados
Eje cafetero	1962/07/30	64	8	N/A	N/A*
Salento, Quindío	1973/04/03	150	4	0,04	N/A*
Convención, Norte de Santander	1973/08/30	180	4	0,04	N/A*
Eje cafetero	1979/11/23	110	7	0,18	Moderados

(Servicio Geológico Colombiano, 2023). *Datos no registrados para Jericó.

En la tabla anterior se puede apreciar de igual manera una transformación de la intensidad en la escala mencionada a PGA mediante la expresión que se puede ver a continuación en la Ecuación 14 propuesta por el Laboratorio de Ingeniería Sísmica de Costa Rica, (2008).

$$MM_i = 4,6 \log_{10}(PGA) - 3.38$$

Ecuación 14.

Cabe mencionar que la anterior ecuación aplica solo para intensidades medidas con la escala de Mercalli modificada entre 5 y 7. Para otros rangos fueron postuladas diferentes expresiones y para valores de intensidad mayores a 7 no se cuenta con un acercamiento.

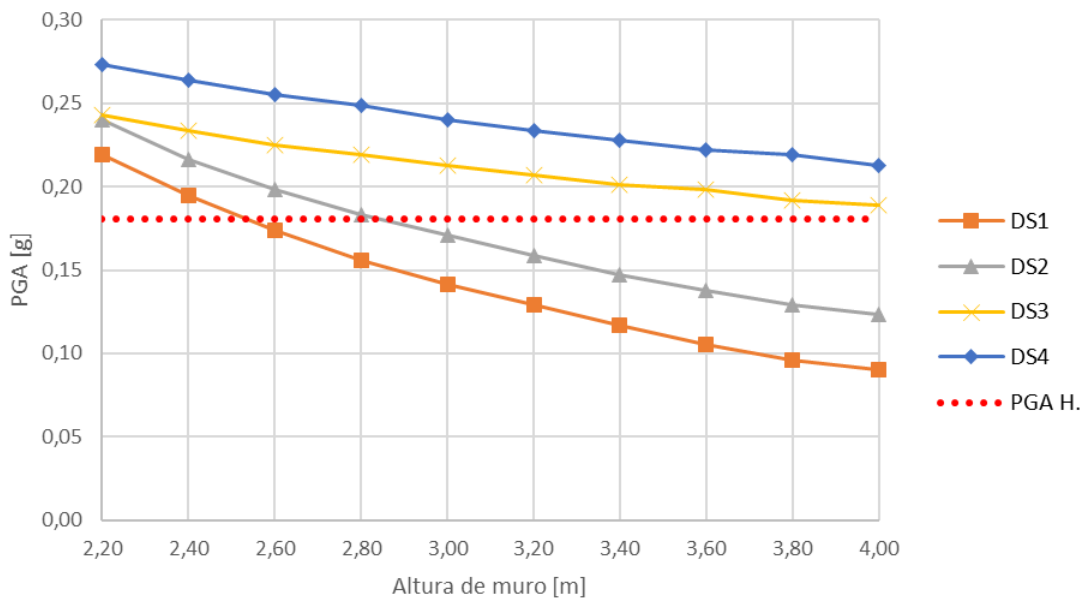


Figura 43. Valores de PGA para cada estado de daño según altura de muro Vs. sismos históricos de Jericó

En la Figura 43 se analiza el desempeño del muro en función de su altura, y tal como se puede apreciar, existe una relación inversamente proporcional entre el PGA requerido para provocar un daño determinado y la altura del muro o directamente proporcional entre la altura del muro y la vulnerabilidad del mismo, confirmando que, a mayor altura de muro, mayor será la vulnerabilidad del muro estudiado para todos los estados de daño, puesto que se requerirá un PGA cada vez menor para provocar un mismo daño en el muro. Tal como se puede ver también

en la Figura 43 los muros con altura mayor a 2,4 m muestran una capacidad similar a la demanda de los eventos históricos estudiados, implicando esto que, muros con esta o una mayor altura, ante la llegada de un evento sísmico similar, sufrirán daños. Esto se debe a la poca capacidad elástica que presentan los materiales que conforman al muro, que, aunque pretenda aumentar su flexibilidad mediante su altura, la misma rigidez dictada por sus leyes constitutivas provocará el efecto contrario, permitiendo un menor desplazamiento fuera del plano del muro a medida que aumenta su altura. El valor del PGA H. (PGA Histórico del municipio de Jericó) que se puede observar en esta gráfica corresponde a un PGA de 0,18 g, extraído de los registros sísmicos del municipio de Jericó para los eventos mencionados en la Tabla 16.

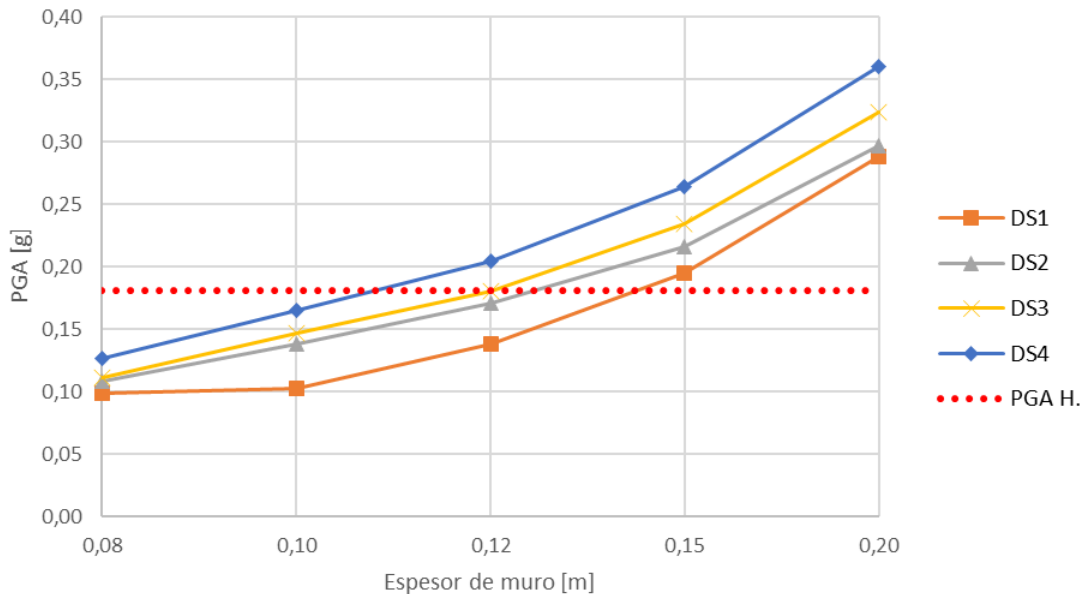


Figura 44. Valores de PGA para cada estado de daño según espesor de muro Vs. sismos históricos de Jericó

En la Figura 44 es posible visualizar la capacidad del muro en función del espesor del mismo, en la misma se muestra claramente la significancia del espesor del muro en el PGA requerido para provocar un estado de daño, esto es debido al aumento en el área de contacto del muro estudiado en la dirección ortogonal al plano del muro (misma dirección de una eventual falla fuera del plano), implicando siempre que, un espesor de muro mayor es reductor de la vulnerabilidad del CER estudiado, mostrando un comportamiento inversamente proporcional

entre el espesor del muro y su vulnerabilidad. Es posible observar que solo los muros con espesores reducidos, menores a 15 cm pueden ser vulnerables ante eventos sísmicos similares a los históricos de la zona de estudio.

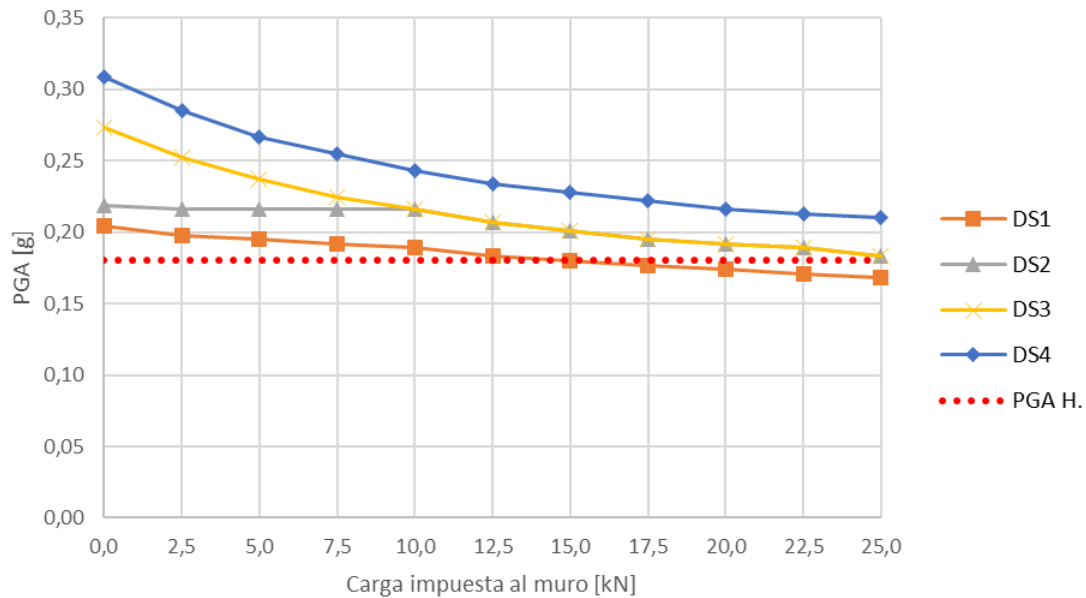


Figura 45. Valores de PGA para cada estado de daño según carga de muro Vs. sismos históricos de Jericó

Finalmente, la Figura 45, que muestra la relación entre la carga impuesta sobre el muro estudiado y la capacidad fuera del plano de este, permite inferir que, ante una mayor carga impuesta en el muro, debido a otro nivel o a una cubierta, la vulnerabilidad de este se vería aumentada debido a la compresión transmitida al muro que, siendo baja podrá aportar positivamente ante la vulnerabilidad, pero su aumento implicará un aumento también en la vulnerabilidad del muro, y, por lo tanto, de la edificación estudiada. Tal como se puede ver en esta gráfica, las estructuras sometidas a cualquier nivel de carga presentarán, ante la ocasión de un evento sísmico como los estudiados, daños asociados al nivel DS1. Se debe tener en cuenta además que la inexistencia de carga aplicada sobre un muro podría implicar un cambio en la condición de apoyo que se asume para el estudio, pues este caso de un muro sin carga implicaría que este posee un comportamiento alineado con las condiciones de frontera de un muro

Cantilever o en voladizo, que, por naturaleza, será más vulnerable que aquellos con condiciones de frontera Pinned-Pinned o Clamped-Clamped.

4.4. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA EL CASO DE ESTUDIO, JERICÓ

La coherencia en los resultados mostrados en anteriores Capítulos permite continuar con el uso de la metodología adaptada de lo propuesto por Giordano et al., (2020). Con base en lo mencionado, del total de 47 muros encontrados (principales) en la visita de campo realizada en Jericó para los CERs que se pueden ver en la Tabla 10, se obtuvo un total de 136 muros sin presencia de vacíos que serán los estudiados a continuación.

Tabla 10. Muros con vacíos y sin vacíos, CERs Jericó

CENTRO EDUCATIVO RURAL	UBICACIÓN	MUROS PRINCIPALES	MUROS SIN VACÍOS
Monseñor Augusto Trujillo Arango	Vereda Zacatín	6	13
Álvaro Ardulio Naranjo	Vereda La Aguada	9	18
Estrella Vieja	Vereda Estrella Vieja	4	10
Avelino Marín	Vereda Quebradona Arriba	4	9
Santiago Santamaría	Vereda Castalia	4	36
La Pradera	Vereda Pradera	8	14
Escuela Nueva La Leona	Vereda La Leona	8	26
Escuela La Cascada Normal	Verea La Cascada	4	10

Lo anterior fue obtenido mediante la modelación de cada uno de estos muros principales en un software de dibujo. De igual manera, a partir del análisis de las fotografías fue posible determinar el material de composición de las diferentes cubiertas, y, de esta manera conocer, aproximadamente, la carga que soporta cada muro en función de su longitud.

A modo de ejemplo, a continuación, se puede observar la caracterización del CER Monseñor Augusto Trujillo Arango ubicado en la vereda Zacatín (ver Figura 46) para la consecución de los muros sin vacíos que componen su estructura, mediante la Tabla 11 y la Figura 47, recordando que la condición de frontera indicada obedece a la presencia de cargas de cubierta dispuestas sobre los muros estudiados.



Figura 46. Fachada del CER Monseñor Augusto Trujillo Arango

Tabla 11. Muros sin vacíos, caracterización CER Monseñor Augusto Trujillo Arango

MURO BASE	MURO	ID	CONDICIÓN	LONGITUD [m]	ALTURA MURO [m]	ESPESOR [m]	CARGA [kN]
1	1	1 - 1	Pinned - Pinned	1,4	2,9	0,12	0,61
1	2	1 - 2	Pinned - Pinned	0,4	2,9	0,12	0,18
1	3	1 - 3	Pinned - Pinned	0,6	2,9	0,12	0,26
1	4	1 - 4	Pinned - Pinned	0,5	2,9	0,12	0,22
1	5	1 - 5	Pinned - Pinned	0,8	2,9	0,12	0,35
2	1	2 - 1	Pinned - Pinned	5,25	2,9	0,12	4,31
2	2	2 - 2	Pinned - Pinned	2,8	2,9	0,12	2,3
3	1	3 - 1	Pinned - Pinned	7,3	2,9	0,12	6,61
4	1	4 - 1	Pinned - Pinned	2,8	2,9	0,12	1,57
5	1	5 - 1	Pinned - Pinned	1,8	2,9	0,12	0,5
5	2	5 - 2	Pinned - Pinned	1,4	2,9	0,12	0,39
6	1	6 - 1	Pinned - Pinned	1,7	2,9	0,12	0,45
6	2	6 - 2	Pinned - Pinned	1,3	2,9	0,12	0,34

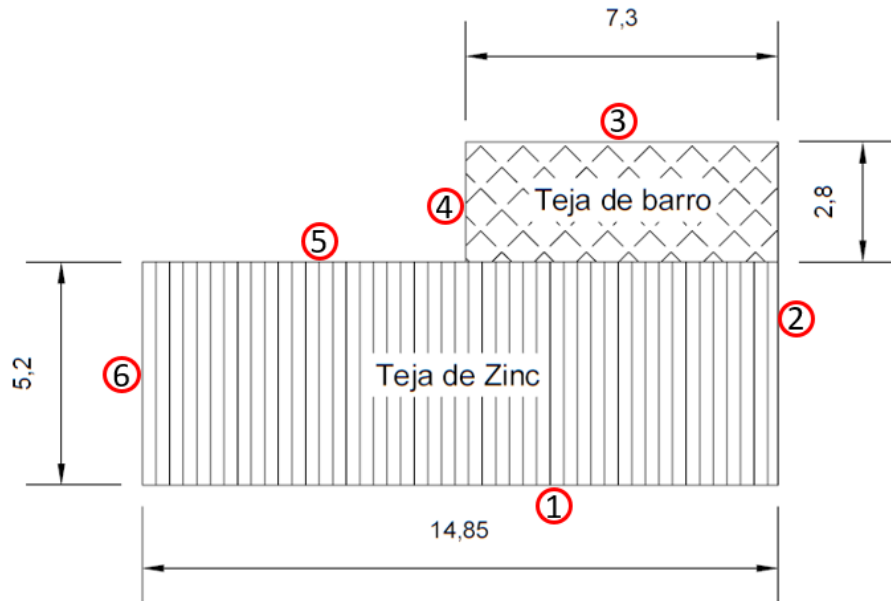


Figura 47. Esquema CER Monseñor Augusto Trujillo Arango (medidas en metros)

Con la caracterización de los muros sin vacíos de todos los CERs visitados, fue posible calcular el desplazamiento y fuerza asociadas a cada estado de daño (DS).

Inicialmente, tal como se puede apreciar en Tabla 12, en la Tabla 13, en la Figura 48 y en la Figura 49, en las cuales se analizó estadísticamente los muros en función de los desplazamientos asociados a cada estado de daño, se pudo corroborar la naturaleza enfocada en el desplazamiento del muro que posee esta metodología propuesta por Giordano et al., (2020), puesto que la gravedad de cada estado de daño es directamente proporcional al desplazamiento que puede experimentar el muro estudiado, implicando esto que, ante la aparición de un desplazamiento mayor, más grave será el estado de daño del muro estudiado, tal como cabría esperar del planteamiento que se puede ver en la Tabla 4. Además de lo anterior, es posible observar que los rango que poseen los desplazamientos en cada estado de daño aumenta con la gravedad de los daños del muro, confirmando la gran variación en el comportamiento que pueden poseer los muros en sus estados finales de daño según cada una de sus características.

Tabla 12. Caracterización estadística de los Desplazamientos para cada DS, muros sin vacíos

VARIABLE	Δ DS1 [mm]	Δ DS2 [mm]	Δ DS3 [mm]	Δ DS4 [mm]
Media	0,057	3,060	28,000	44,816
Error típico	0,006	0,092	0,400	0,641
Mediana	0,036	2,741	27,216	43,560
Moda	0,036	2,448	22,896	36,648
Desviación estándar	0,066	1,072	4,649	7,445
Varianza de la muestra	0,000	0,001	0,022	0,055
Curtosis	8727,296	7110,758	-1657,466	-1658,971
Coefficiente de asimetría	3235,369	2847,556	168,564	167,034
Rango	0,260	4,488	13,400	21,423
Mínimo	0,029	2,448	22,234	35,585
Máximo	0,289	6,936	35,634	57,008

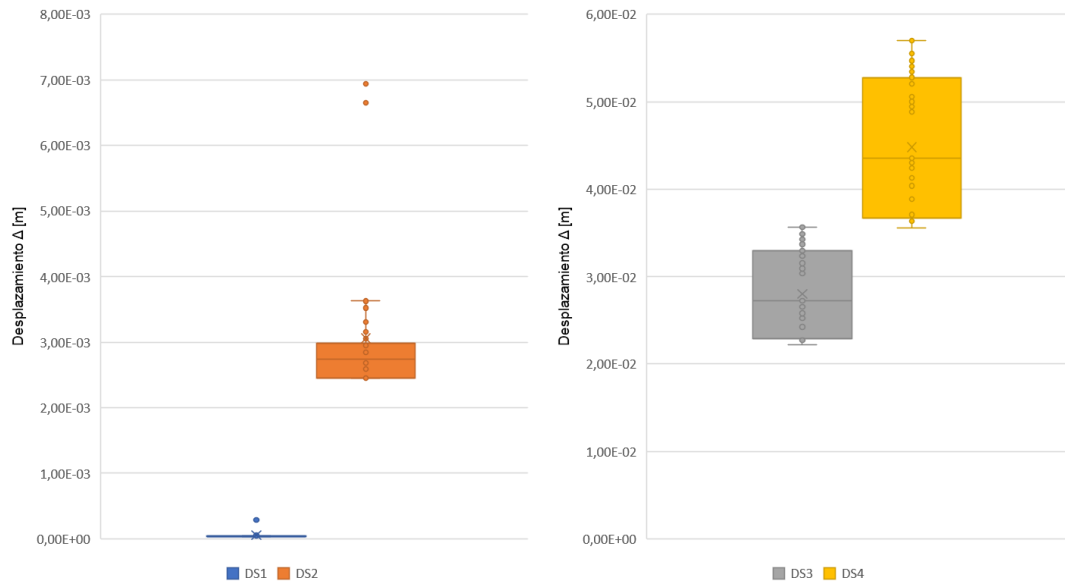


Figura 48. Distribución de Desplazamientos según el estado de daño, muros sin vacíos

Tabla 13. Caracterización estadística de las Derivas para cada DS, muros sin vacíos

VARIABLE	D DS1 [%]	D DS2 [%]	D DS3 [%]	D DS4 [%]
Media	2,065E-03	1,180E-01	1,112E+00	1,780E+00
Error típico	1,576E-04	2,059E-03	1,957E-02	3,131E-02
Mediana	1,500E-03	1,106E-01	9,660E-01	1,545E+00
Moda	1,500E-03	1,020E-01	9,540E-01	1,527E+00
Desviación estándar	1,831E-03	2,392E-02	2,274E-01	3,638E-01
Varianza de la muestra	3,352E-06	5,723E-04	5,171E-02	1,324E-01
Curtosis	8,844E+00	6,068E+00	-5,410E-01	-5,406E-01
Coefficiente de asimetría	3,263E+00	2,563E+00	7,983E-01	7,995E-01
Rango	7,150E-03	1,020E-01	8,830E-01	1,412E+00
Mínimo	1,350E-03	1,020E-01	7,667E-01	1,227E+00
Máximo	8,500E-03	2,040E-01	1,650E+00	2,639E+00

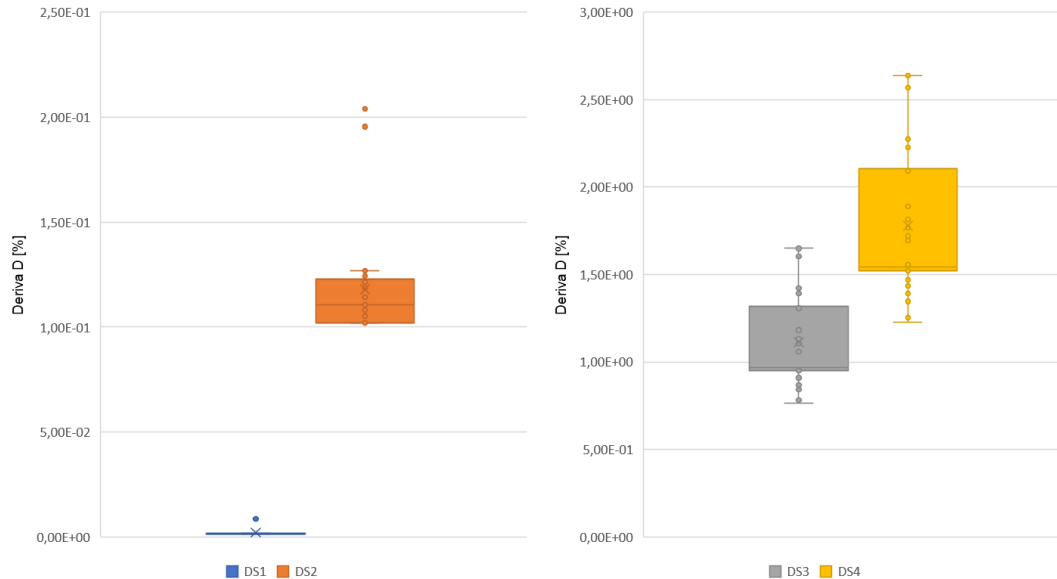


Figura 49. Distribución de Derivas según el estado de daño, muros sin vacíos

Tras lo anterior, se pudo analizar estadísticamente los muros en función de las fuerzas asociadas a cada estado de daño (ver Tabla 14, Tabla 15, Figura 50 y Figura 51). El comportamiento de las fuerzas que soportan los muros estudiados en función de los estados de daño es diferente al visto en los desplazamientos, aquí no se observa proporcionalidad entre la gravedad de los daños y las fuerzas presentadas, sino más bien una distribución similar, tal como es de esperar, a la curva de capacidad del muro, en donde las fuerzas asociadas al estado de daño 2 (DS2), son las mayores en relación con las demás asociadas los otros estados de daño.

A pesar de lo anterior y de poder identificar con relativa sencillez este comportamiento, se puede apreciar que la variación o rango en el que se mueven estas fuerzas, para los diferentes estados de daño, es amplia, implicando esto que los muros pueden soportar fuerzas de magnitudes muy diferentes en función de sus características asociadas.

Tabla 14. Caracterización estadística de las Fuerzas para cada DS, muros sin vacíos

VARIABLE	F DS1 [kN]	F DS2 [kN]	F DS3 [kN]	F DS4 [kN]
Media	0,851	1,362	1,086	0,872
Error típico	0,081	0,127	0,101	0,081
Mediana	0,515	0,820	0,656	0,527
Moda	0,539	0,878	0,701	0,563
Desviación estándar	0,939	1,478	1,173	0,941
Varianza de la muestra	0,882	2,184	1,376	0,886
Curtosis	2,284	2,167	2,152	2,150
Coefficiente de asimetría	1,884	1,852	1,846	1,846
Rango	3,741	5,751	4,537	3,636
Mínimo	0,126	0,216	0,181	0,147
Máximo	3,868	5,967	4,718	3,783

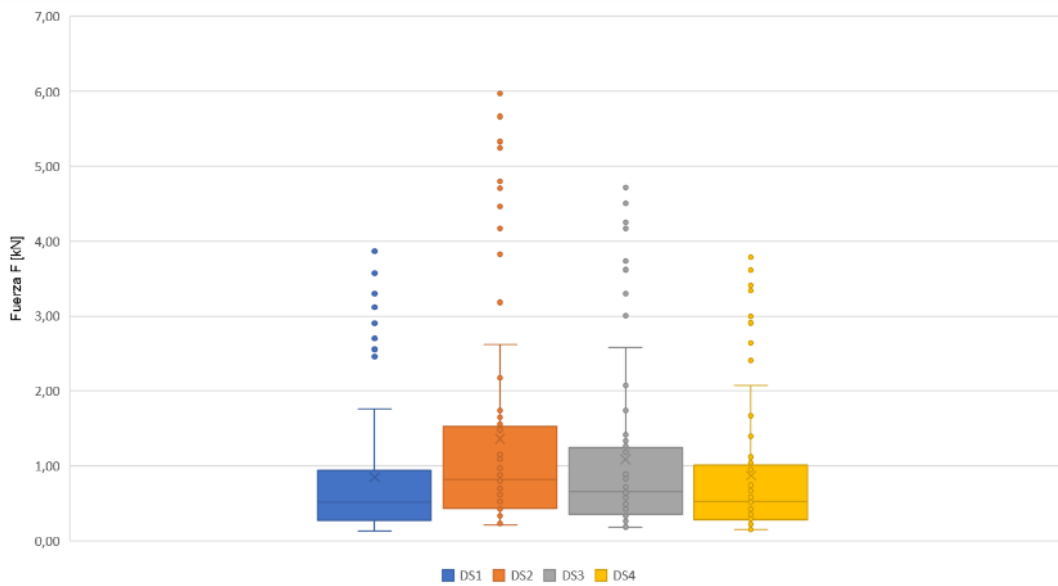


Figura 50. Distribución de Fuerzas según el estado de daño, muros sin vacíos

Tabla 15. Caracterización estadística de las Fuerzas normalizadas para cada DS, muros sin vacíos

VARIABLE	F/(N+W) DS1	F/(N+W) DS2	F/(N+W) DS3	F/(N+W) DS4
Media	1,170E-01	1,870E-01	1,489E-01	1,195E-01
Error típico	2,995E-03	4,352E-03	3,384E-03	2,709E-03
Mediana	1,171E-01	1,907E-01	1,523E-01	1,222E-01
Moda	1,171E-01	1,907E-01	1,523E-01	1,222E-01
Desviación estándar	3,480E-02	5,057E-02	3,932E-02	3,148E-02
Varianza de la muestra	1,211E-03	2,557E-03	1,546E-03	9,909E-04
Curtosis	1,956E+00	3,332E+00	3,536E+00	3,552E+00
Coefficiente de asimetría	-1,298E+00	-1,775E+00	-1,845E+00	-1,851E+00
Rango	1,510E-01	2,208E-01	1,715E-01	1,373E-01
Mínimo	2,142E-02	3,707E-02	3,120E-02	2,522E-02
Máximo	1,724E-01	2,579E-01	2,027E-01	1,625E-01

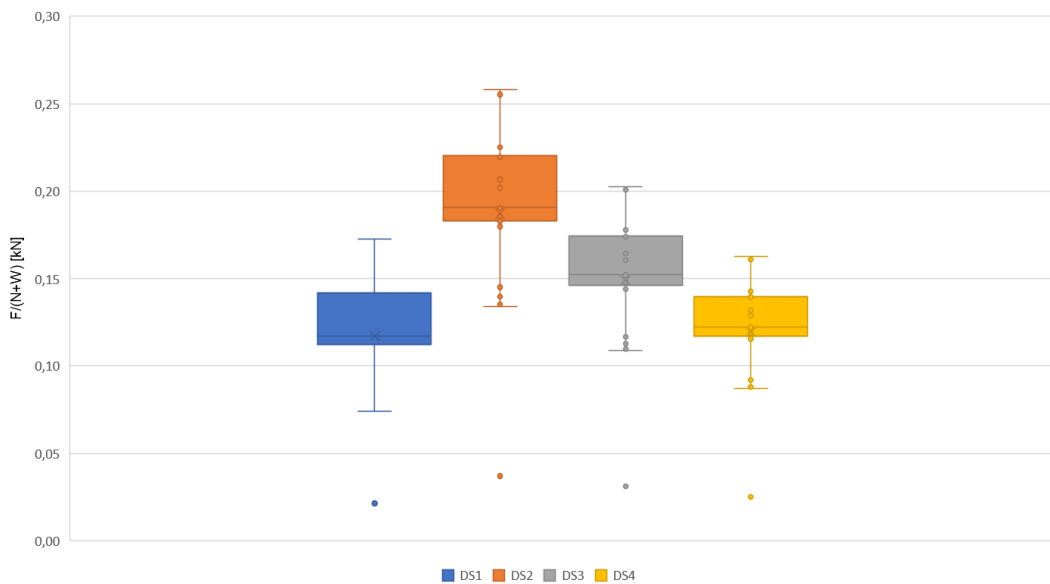


Figura 51. Distribución de Fuerzas normalizadas según el estado de daño, muros sin vacíos

Finalmente, tras conocer el comportamiento de las fuerzas y desplazamientos asociados a cada uno de los estados de daño de los muros estudiados, fue posible también plantear un análisis del PGA en función del estado de daño del muro, resultando en lo que se puede ver en la Tabla 16 y en la Figura 52.

Tabla 16. Caracterización estadística de los PGA para cada DS, muros sin vacíos

VARIABLE	PGA DS1 [g]	PGA DS2 [g]	PGA DS3 [g]	PGA DS4 [g]
Media	0,170	0,194	0,220	0,249
Error típico	0,004	0,004	0,004	0,004
Mediana	0,186	0,213	0,216	0,243
Moda	0,186	0,216	0,213	0,243
Desviación estándar	0,052	0,048	0,042	0,048
Varianza de la muestra	0,003	0,002	0,002	0,002
Curtosis	3,031	3,389	2,076	2,166
Coefficiente de asimetría	-1,897	-2,020	-1,336	-1,363
Rango	0,213	0,195	0,183	0,207
Mínimo	0,018	0,051	0,099	0,114
Máximo	0,231	0,246	0,282	0,321

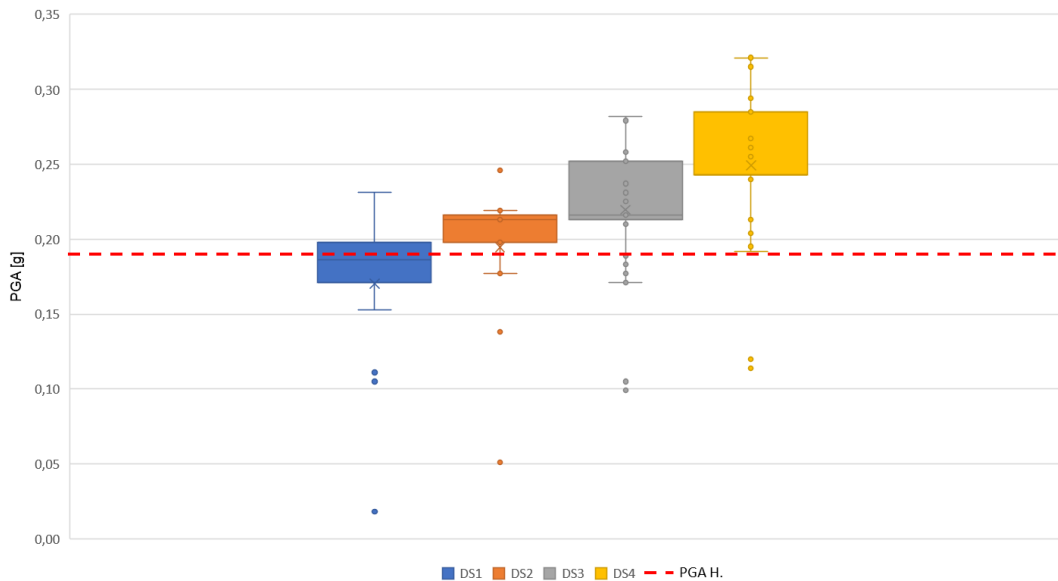


Figura 52. Distribución de PGA según el estado de daño, muros sin vacíos

El PGA asociado a cada estado de daño de los muros estudiados refleja, al igual que el desplazamiento, un comportamiento directamente proporcional a la gravedad del estado de daño, implicando esto que, los estados de daño mayores se darán, casi siempre, en presencia de PGA mayores, reafirmando nuevamente el enfoque en el desplazamiento que posee la metodología planteada por Giordano et al., (2020). Según lo anterior, es posible identificar que lo usual es encontrar valores de PGA requeridos para provocar un daño mayores a los que se

han presentado históricamente en el municipio de Jericó, sobre todo para los DS3 o DS4, sin embargo, es posible observar también que existen valores menores a estos umbrales históricos, sobre todo en DS1 y DS2, lo cual indica que para los registros históricos que se han presentado en la zona de estudio, los daños que se presentaron varían entre leves y moderados. Según el análisis realizado en términos de PGA, es poco probable que se registraran daños severos o colapsos durante los eventos registrados en el pasado. Lo anterior es consistente con los reportes que se encontraron de estos eventos.

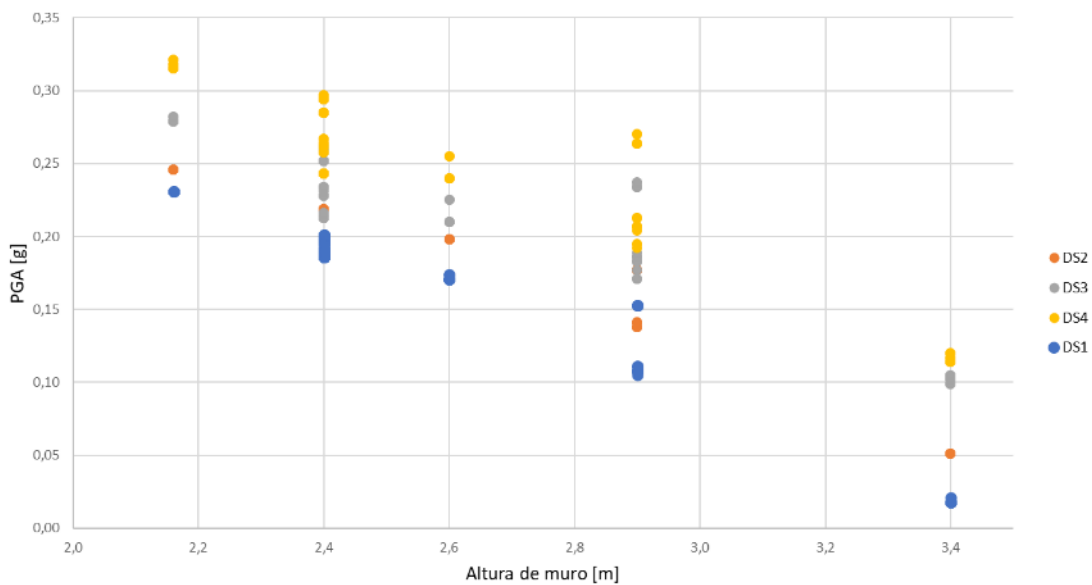


Figura 53. PGA vs Altura de muro para los muros sin vacíos

Analizando el comportamiento de los PGA asociados a cada DS según la variación de la altura de los muros estudiados, es posible observar, tal como se había visto en Capítulos anteriores, que la altura del muro es directamente proporcional a la vulnerabilidad del muro, puesto que, a mayor altura de estos, mayor vulnerabilidad en el muro, tal como se puede ver en la Figura 53.

Es posible identificar que los muros con alturas mayores pueden tener un PGA, asociado a sus respectivos estados de daño, menor al PGA utilizado como umbral dado por los eventos históricos del municipio de Jericó utilizado en Capítulos anteriores, lo cual implica que es más

probable la materialización de esta vulnerabilidad para estos casos de muros significativamente altos y que el presente estudio lo respalda.

De igual manera, es posible identificar la marcada tendencia que experimentan estos valores, pues los mismos se organizan, con errores bajos, en un ajuste lineal.

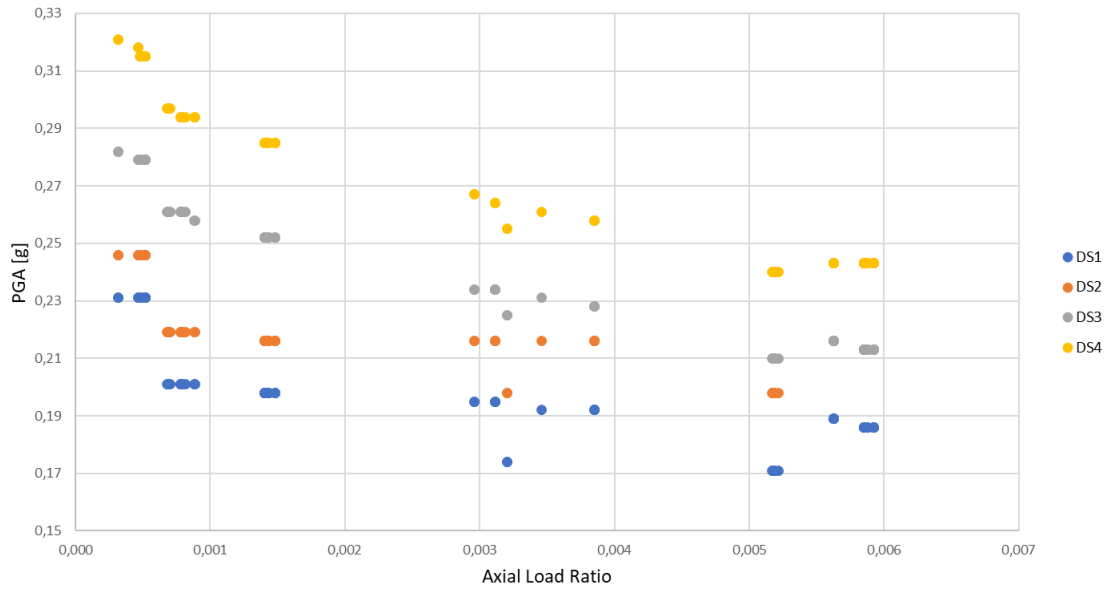


Figura 54. PGA vs ALR para los muros sin vacíos

Siguiendo con el análisis y observando el proceder de la carga impuesta sobre el muro, normalizándola como un Axial Load Ratio (ALR) obtenida mediante la Ecuación 15, y utilizando los datos de muros con alturas menores a 2,6 m (según lo anteriormente expuesto, menos vulnerables), se puede observar que, tal como se había mencionado previamente, el comportamiento de la vulnerabilidad de estos muros es directamente proporcional a la carga a la que están expuestos (ver Figura 54).

$$ALR = \frac{Carga[kN]}{f'_{mb} \left[\frac{kN}{m^2} \right] \text{Área muro} [m^2]}$$

Ecuación 15.

Es identificable la tendencia que sigue el conjunto de puntos, en donde un aumento del ALR tiene una marcada tendencia sobre los PGA de todos los estados de daño disminuyendo la marcada pendiente que se puede notar a la izquierda de esta gráfica y mostrando un cambio en

los valores de PGA requeridos para provocar daños menores a medida que se aumenta dicho ALR.

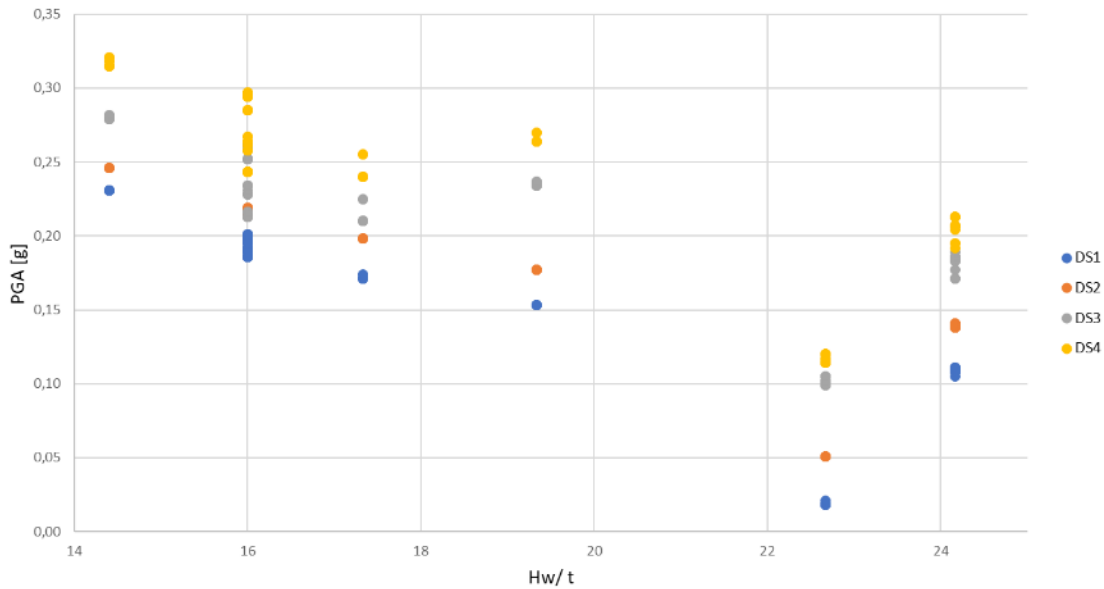


Figura 55. PGA vs Hw/t para los muros sin vacíos

Finalmente, es posible observar el comportamiento del PGA de los diferentes estados de daño de los muros estudiados en función de su espesor gracias a una normalización propuesta como la altura sobre dicho espesor, permitiendo configurar lo que se puede ver en la Figura 55 en donde es apreciable la relación directamente proporcional que posee esta variable construida y la vulnerabilidad de los muros, pues una relación de altura de muro y espesor mayor implicará una mayor vulnerabilidad del muro, en algunos casos, con PGA menores a los asociados a eventos sísmicos históricos del municipio de Jericó.

La frecuencia de los espesores de muros estudiados nos indica que el grueso de estos posee un espesor de 15 cm, dictado por los ladrillos más comunes en la región de 15 cm de ancho. A continuación, es posible validar lo anteriormente mencionado y, además, validar el comportamiento de los diferentes PGA para cada estado de daño según el espesor de muro estudiado, según se puede ver en la Tabla 17, en la Figura 56 y en la Figura 57.

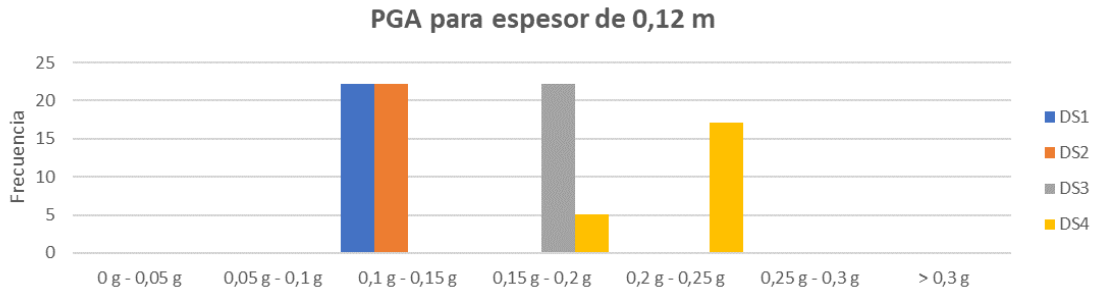


Figura 56. Frecuencia de PGA para muros con espesor de 12 cm

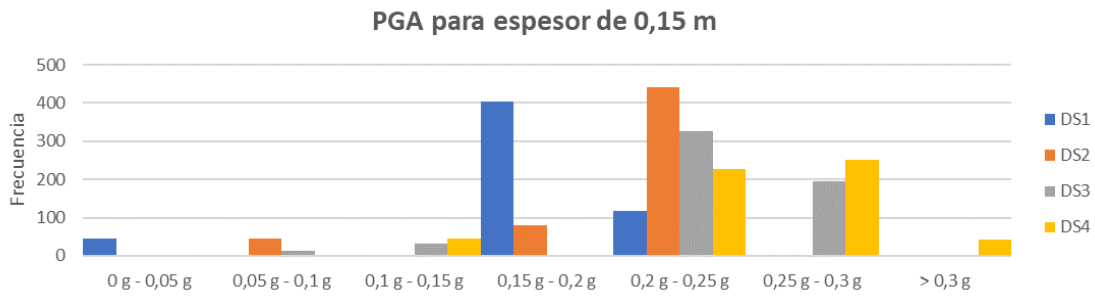


Figura 57. Frecuencia de PGA para muros con espesor de 15 cm

Tabla 17. Muros sin vacíos, PGA en función de espesor

MUROS POR RANGO DE ESPESOR (-)			
Espesor muro [m]	Cantidad muros	Frecuencia muros	Cantidad DS contados
0,12	13	9,63%	52
0,15	122	90,37%	488

5. CASOS DE ESTUDIO: EVALUACIÓN CON BASE EN LA OPINIÓN DE EXPERTOS

En este Capítulo se presentan ocho Escuelas ubicadas en zona rural Jericó, Antioquia, las cuales fueron seleccionadas como casos de estudio para implementar la metodología desarrollada en este trabajo para la evaluación rápida cualitativa de Centros Educativos Rurales. A continuación, se presenta una descripción de cada uno de los casos de estudio y se realiza una evaluación con base en la opinión de expertos en el tema de vulnerabilidad y riesgo sísmico con el fin de plantear una comparación entre esta evaluación y la abordada en el presente estudio. Para la evaluación, se utilizan tres categorías y la siguiente escala de colores: Vulnerabilidad baja (color verde), vulnerabilidad intermedia (color amarillo) y vulnerabilidad alta (color rojo).

5.1. CER MONSEÑOR AUGUSTO TRUJILLO ARANGO

Ubicado en la Vereda El Zacatín, con el aspecto que se puede ver en la Figura 58. Está compuesto por un módulo estructural construido en mampostería semi confinada, emplazado en terreno plano, con una cubierta ligera compuesta por tejas de arcilla y por láminas de asbesto cemento apoyadas debidamente sobre las vigas de remate y las culatas.

Esta estructura se encuentra en buen estado, no se observan daños en la estructura ni en la cubierta. Se observa un buen manejo de agua lluvia, pues cuenta con canoas debidamente dispuestas y bajantes que no permiten que la energía del agua afecte la conformación del suelo en el que se emplaza la estructura, reduciendo de esta forma la probabilidad de que se produzcan asentamientos diferenciales.

Por otro lado, la estructura de mampostería semi confinada cuenta con un espesor de muros de 12 cm, muros entre 5 y 14 m de largo y una altura de 2,9 m, cuenta con un solo nivel, con vigas de amarre que garantizan la integridad del sistema ante la llegada de una fuerza horizontal y una cubierta ligera que no induce una carga elevada a la estructura.



Figura 58. CER Monseñor Augusto Trujillo Arango

Por lo anterior, esta estructura estudiada se ubica en la categoría de vulnerabilidad baja, la cual se representa con un color verde.

5.2. CER ÁLVARO ARDULIO NARANJO

Ubicado en la Vereda La Aguada, es un centro educativo compuesto por 2 módulos estructurales construidos en mampostería confinada (módulo derecho) y en mampostería simple (módulo izquierdo), tal como se puede ver en la Figura 59. Este centro educativo está emplazado en terreno ondulado que presenta un fenómeno de deslizamiento evidenciado en el movimiento de masa que se puede ver en la Figura 60 y en otras afectaciones que serán detalladas más adelante. El módulo construido en mampostería confinada cuenta con una cubierta ligera compuesta por láminas de asbesto cemento apoyadas debidamente sobre las vigas de remate y las culatas, mientras que el segundo módulo cuenta con una cubierta, compuesta de madera y tejas de arcilla, apoyada directamente sobre los muros generando grietas por el esfuerzo de punzonamiento (ver Figura 61). Cabe mencionar que entre ambos módulos existe un espacio cubierto por tejas de asbesto cemento y un desnivel tratado con una lámina metálica fijada indebidamente mediante varias tejas de arcilla.



Figura 59. CER Álvaro Ardulio Naranjo



Figura 60. Deslizamiento en CER Álvaro Ardulio Naranjo



Figura 61. Apoyo de cubierta y afectaciones de esta, CER Álvaro Ardulio Naranjo

Esta estructura se encuentra expuesta al riesgo generado por el movimiento de masa mencionado, el cual, además de las afectaciones que se presentan en el muro perimetral vistas en la Figura 60, provoca afectaciones en la estructura más vulnerable del CER, la construida en mampostería simple, ya que dicho movimiento de masa genera una tendencia a la rotación de esta estructura, y la misma, al no contar con un sistema capaz de soportar las sollicitaciones, disipa su energía mediante daños evidenciados en la edificación (Figura 61 y Figura 62).



Figura 62. Afectaciones en módulo de mampostería simple, CER Álvaro Ardulio Naranjo

En general el CER cuenta con una buena estructura para el manejo de aguas lluvias, puesto que el módulo de mampostería confinada tiene canoas y bajantes suficientes para cumplir con esta tarea, mientras que el otro módulo, el de mampostería simple, cuenta con estructura para manejo de aguas lluvia solo en los costados exteriores del CER, dejando sin las mismas a

los costados internos (ver Figura 63) que justamente podrían llegar a agravar la situación de la inestabilidad del terreno.



Figura 63. Costado interno. CER Álvaro Ardulio Naranjo

Finalmente, las características de las estructuras son muros de 15 cm de espesor, de entre 3,1 y 13,4 m de largo y una altura de entre 2,9 y 3,4 m, ambos módulos cuentan con un solo nivel, y cubiertas que pueden ser consideradas como ligeras, ya que no inducen un alto nivel de carga gravitacional a la estructura.

Por lo anteriormente mencionado, entre las tres categorías de vulnerabilidad propuestas en el presente estudio, este CER, debido a las afectaciones que presenta el módulo construido en mampostería simple, se ubica en la categoría de vulnerabilidad alta representada con color rojo, lo cual significa que se debe realizar una inspección detallada del mismo con urgencia o una intervención directa sobre el módulo afectado. Cabe mencionar que el módulo estructural de mampostería confinada no presenta una vulnerabilidad significativa, por lo tanto, el presente estudio se enfocó en el módulo mencionado para este título.

5.3. CER ESTRELLA VIEJA

Ubicado en la Vereda Estrella Vieja, es un centro educativo compuesto por 2 módulos estructurales construidos en mampostería simple y mampostería semi confinada (ver Figura 64 y Figura 65, respectivamente), está emplazado en terreno ondulado, cuenta con una cubierta ligera compuesta de madera y tejas de arcilla, apoyada directamente sobre los muros en el módulo utilizado para las aulas y sobre la viga de remate en el módulo utilizado para los baños, almacén y espacio habitacional del viviente. Cuenta con una zona empleada como comedor compuesta por elementos de madera apoyados directamente sobre el acabado de piso (ver Figura 64) y tejas de asbesto cemento.



Figura 64. Cubierta de comedor y módulo de aulas. CER Estrella Vieja

El módulo estructural que se puede ver en la Figura 65 está construido en su primer nivel en mampostería semi confinada y es utilizado para los baños y para el almacén, mientras que su segundo nivel, se utiliza como espacio habitacional para el viviente, está construido en lo que se podría considerar como mampostería semi confinada ya que cuenta con una viga de remate que podría propiciar el movimiento propio de un diafragma semi rígido, pero no cuenta con los elementos verticales para catalogar dicha tipología como mampostería confinada.



Figura 65. Segundo módulo y espacio para el "vigilante". CER Estrella Vieja

Además de lo mencionado anteriormente, la estructura cuenta con manejo de aguas lluvias solo en uno de sus costados y en uno de sus módulos (el utilizado para impartir las clases, módulo que se puede ver en la Figura 66), cuenta también con muros de 15 cm de espesor, de entre 5,5 y 14 m de largo y una altura de 2,6 m.

El personal que hace uso de esta estructura se encuentra expuesto, principalmente, al riesgo generado por los apoyos de la cubierta utilizada en la zona empleada como comedor, puesto que, una fuerza horizontal significativa proveniente de un evento natural o de una interacción con las personas que todos los días hacen uso de la edificación, podría generar fácilmente un colapso.



Figura 66. CER Estrella Vieja

Por lo anteriormente mencionado, entre las tres categorías de vulnerabilidad propuestas en el presente estudio, este CER, debido al peligro inminente generado por la cubierta utilizada en el comedor, al manejo de aguas presente solo en un costado de la estructura y en solo uno de sus módulos y a la construcción realizada en mampostería simple, se ubica en la categoría roja, lo cual significa que se debe realizar una inspección detallada del mismo con urgencia o una intervención directa sobre las zonas afectadas.

5.4. CER AVELINO MARÍN B.

Ubicado en la Vereda Quebradona Arriba, es un centro educativo compuesto por 2 módulos estructurales construidos en mampostería semi confinada (ver Figura 67 y Figura 68) y un espacio destinado al comedor compuesto por una cubierta de láminas metálicas apoyada en elementos de madera a lo largo de un semi muro perimetral (ver Figura 69), está emplazado en terreno ondulado con un acceso complicado por la composición del camino y su pronunciada pendiente. El módulo destinado para las aulas cuenta con una cubierta ligera compuesta de cerchas y láminas metálicas, mientras que el módulo empleado para los baños y para el viviente cuenta con una cubierta compuesta por madera y tejas de arcilla.



Figura 67. CER Avelino Marín B.



Figura 68. Módulo destinado a aulas. CER Avelino Marín B.

De los tres espacios demarcados, el único que cuenta con un adecuado manejo de aguas es el destinado a las aulas, el módulo destinado para el viviente y la cubierta del comedor no cuenta con infraestructura destinada para este fin, además de esto, la estructura en general

cuenta también con muros de 15 cm de espesor, de entre 3,9 y 10 m de largo y una altura de 2,16 m.



Figura 69. Cubierta de comedor. CER Avelino Marín B.

Al igual que en el anterior CER estudiado, el personal que hace uso de esta estructura se encuentra expuesto al riesgo generado por los apoyos de la cubierta del comedor, puesto que, una fuerza horizontal significativa proveniente de un evento natural o de una interacción con las personas que todos los días hacen uso de la edificación, podría generar fácilmente un colapso.

Por esto, entre las tres categorías de vulnerabilidad propuestas en el presente estudio, este CER, debido al peligro inminente generado por la cubierta del comedor y al manejo de aguas presente solo en un módulo estructural, se ubica en la categoría amarilla, lo cual significa que se debe realizar una inspección detallada del mismo con el fin de determinar la premura con la cual se debe proceder en la intervención.

5.5. CER SANTIAGO SANTA MARÍA

Ubicado en la Vereda Castalia, es un centro educativo compuesto por 1 módulo estructural construido en mampostería semi confinada (ver Figura 70) utilizado para todas las funciones propias del CER, está emplazado en terreno ondulado, relativamente cerca de la

cabecera municipal, con un fácil acceso, cuenta con una cubierta ligera compuesta por madera y tejas de arcilla.



Figura 70. CER Santiago Santa María

El CER Santiago Santa María cuenta con una infraestructura para el manejo de aguas lluvias adecuado, con muros de 15 cm de espesor, de entre 5.2 y 46 m de largo (divididos por elementos estructurales verticales) y una altura de 2,4 m.

Por esto, entre las tres categorías de vulnerabilidad propuestas en el presente estudio, este CER, debido a la ausencia de peligros generada por una correcta calidad de la estructura y de la cubierta, se ubica en la categoría verde, lo cual significa que no requiere inspección detallada ni intervención en el corto plazo.

5.6. CER LA PRADERA

Ubicado en la Vereda Pradera, es un centro educativo compuesto por 2 módulos estructurales interconectados entre sí y que, a simple vista, pueden parecer uno solo, están construidos en mampostería semi confinada y mampostería simple (ver Figura 71), emplazados en terreno montañoso con un acceso complicado por la composición del camino, su pronunciada pendiente y los ocasionales derrumbes que se producen sobre éste. El módulo destinado para

las aulas cuenta con una cubierta ligera compuesta por madera y tejas de arcilla apoyada sobre las columnas construidas sin elementos horizontales de remate (ver Figura 72), mientras que el módulo empleado para los baños y para el almacén cuenta con una cubierta compuesta por madera y láminas de asbesto cemento.



Figura 71. CER La Pradera



Figura 72. Interior de aula. CER La Pradera

Además de lo anterior, el CER estudiado cuenta con un apoyo inadecuado de los elementos horizontales de la cubierta (ver Figura 72) y está expuesto a un movimiento en masa producto del talud ubicado en la parte posterior del mismo, el cual cuenta con una pendiente pronunciada (ver Figura 73) muy cercana a la estructura, sobre todo, al módulo con cubierta en lámina de asbesto cemento.



Figura 73. Zona posterior. CER La Pradera

El módulo principal cuenta con manejo de aguas solo en uno de sus costados, la estructura en general cuenta con muros de 15 cm de espesor, entre 2,5 y 15 m de largo y una altura de 2,4 m.

Por lo anterior, entre las tres categorías de vulnerabilidad propuestas en el presente estudio, este CER, debido al peligro generado por el talud ubicado en la zona posterior del CER, al manejo de aguas presente solo en un costado de un módulo estructural y al mal apoyo de la cubierta sobre el módulo principal del CER, se ubica en la categoría roja, lo cual significa que se debe realizar una inspección detallada del mismo con urgencia o una intervención directa sobre el CER.

5.7. CER ESCUELA NUEVA LA LEONA

Ubicado en la Vereda La Leona, es un centro educativo compuesto por 3 módulos estructurales construidos en mampostería semi confinada (ver Figura 74), está emplazado en terreno plano, cuenta con una cubierta ligera compuesta por cerchas metálicas y teja en lámina de asbesto cemento.



Figura 74. CER Nueva La Leona

El CER estudiado no cuenta con una infraestructura para el manejo de aguas lluvias adecuado, cuenta con muros de 15 cm de espesor, entre 5,2 y 27 m de largo y una altura de 2,4 m y con un correcto apoyo de la cubierta sobre los elementos estructurales.

Por esto, entre las tres categorías de vulnerabilidad propuestas en el presente estudio, este CER, debido a la ausencia de peligros generada por una correcta calidad de la estructura y de la cubierta, se ubica en la categoría verde, lo cual implica que no requiere inspección detallada ni intervención en el corto plazo, salvo una observación de los posibles efectos que pueden llegarse a generar por la ausencia de una infraestructura para el manejo de aguas lluvias.

5.8. CER LA CASCADA NORMAL

Ubicado en la Vereda La Cascada, es un centro educativo compuesto por 2 módulos estructurales construidos en mampostería semi confinada (ver Figura 75), está emplazado en terreno plano, cuenta con una cubierta ligera compuesta por madera y tejas de barro.



Figura 75. CER La Cascada Normal



Figura 76. Apoyo de cubierta. CER La Cascada Normal

El CER estudiado cuenta con una infraestructura para el manejo de aguas lluvias solo en uno de sus módulos, la estructura del tejado se apoya sobre la culata de los muros de la dirección más corta (ver Figura 76), pero, a pesar de esto, el sistema estructural carece de elementos de remate horizontales que puedan generar, en conjunto con las columnas existentes, un

comportamiento de diafragma rígido, motivo por el cual no es posible garantizar un comportamiento adecuado ante la llegada de una fuerza horizontal. La estructura cuenta con muros de 15 cm de espesor, entre 5,2 y 23 m de largo y una altura de 2,4 m.

Debido a la ausencia de un sistema estructural que garantice un comportamiento óptimo ante eventos que provoquen fuerzas horizontales, esta estructura se ubica en la categoría amarilla entre las tres categorías de vulnerabilidad propuestas en el presente estudio, lo cual significa que se debe realizar una inspección detallada del mismo con el fin de determinar a premura con la cual se debe proceder en la intervención.

6. METODOLOGÍA CUALITATIVA PARA EVALUAR LA VULNERABILIDAD SÍSMICA.

A diferencia de lo propuesto por la Secretaría de Economía de México en su documento NMX-R079-SCFI-2015 (Secretaría de Economía, 2015) en donde se plantea un procedimiento para el diagnóstico y la evaluación con miras a una reparación de estructuras existentes, consistente en tres niveles que se aplicarán según el requerimiento puntual de la estructura a evaluar, siendo el nivel 1 el asociado a una evaluación sencilla o preliminar y siendo los niveles 2 y 3 asociados a una evaluación profunda que incluso involucre métodos experimentales con el fin de conocer a detalle la capacidad de la edificación estudiada. En donde para este diagnóstico se deberá realizar la evaluación preliminar del nivel 1 se procederá con los niveles 2 y 3 que podrán ser llevados a cabo según un Método A basado en una respuesta lineal de la edificación o según un Método B basado en una respuesta no lineal pseudo estática del sistema estructural de la edificación estudiada. Con el fin de obtener un resultado en la clasificación del daño, en elementos estructurales de la edificación, como insignificante, moderado, severo y muy grave, que permitirá tomar acciones sobre rehabilitación, reparación, demolición, entre otras acciones sobre la estructura estudiada. Y de una manera similar a lo planteado para la República de Kirguistán por el Applied Technology Council & The World Bank, (2019) en donde fueron seleccionadas edificaciones que cumplieran con requisitos de dominio (puntualmente aquellas que fuesen públicas), año de construcción, número de estudiantes, porcentaje de ocupación, área de riesgo sísmico alto, estructuras diseñadas con criterios ingenieriles, entre otros, para realizar una visita. En donde por medio de una visita se permitió caracterizar las tipologías estructurales de estas escuelas y determinar, en función de las propias características de cada sistema, el enfoque que debería tener una eventual rehabilitación de la edificación estudiada puesto que, como se menciona en este documento, el enfoque a la capacidad o a la flexibilidad de la edificación varía en función de cada tipología estructural que dictará si dicho enfoque será o no más rentable y la priorización con que debe ser tratada la escuela estudiada.

Para este trabajo, a partir de la labor realizada en la inspección de Centros Educativos Rurales en el municipio de Jericó, fue posible identificar los parámetros que afectan el desempeño y comportamiento de las tipologías estructurales más representativas. Estos parámetros permitieron plantear el desarrollo de una metodología de evaluación cualitativa de la vulnerabilidad sísmica de CERs a partir de una inspección visual rápida y sin necesidad de un modelo numérico o analítico. Esta metodología permite generar un modelo de priorización enfocado en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de Centros Educativos Rurales construidos en mampostería simple y semi confinada, las cuales son las tipologías más utilizadas para la construcción de este tipo de edificaciones en el departamento de Antioquia, Colombia.

El modelo de priorización se desarrolló con base en la información contenida en el formulario de inspección que se presentó en el Capítulo 2 y, adicionalmente, con la revisión de algunas metodologías existentes como la propuesta por Ningthoujam & Nanda (2018), Didier et al. (2017), Gentile et al. (2019), Caparos et al. (2017), Pujianto et al. (2019), Mohamad et al. (2019), Adhikari et al. (2019) y con las variables implementadas en la propuesta de Giordano et al. (2020) para identificar las características más importantes tanto de la estructura como del sitio en el cual se encuentra localizada. La metodología se desarrolló específicamente para mampostería simple y semi confinada por ser las tipologías más comunes. Así mismo, se analizaron los diferentes tipos de falla que presentan este tipo de estructuras con el fin de determinar la más recurrente y los parámetros que más inciden en el comportamiento de esta tipología constructiva. Se buscó implementar parámetros que pudiesen ser extraídos fácilmente del formulario propuesto en este estudio, que a su vez permitiera la inclusión de un análisis jerárquico para involucrar un juicio de expertos.

6.1. PARÁMETROS PROPUESTOS

Se proponen en total 10 parámetros para evaluar la vulnerabilidad sísmica de cada CER con base en lo encontrado en campo y en la comparación con el formulario planteado inicialmente. Los parámetros elegidos se pueden ver a continuación en la Tabla 18 en conjunto

con las posibles respuestas de cada uno, separadas por una barra y organizadas de izquierda a derecha según su aporte a la vulnerabilidad, donde las que están más hacia la izquierda indican una mayor vulnerabilidad presente en la edificación.

Tabla 18. Parámetros y respuestas para evaluar priorización de intervención en CERs

PARÁMETRO	ABREVIATURA	RESPUESTAS
Ubicación del módulo	UM	Cresta / Ladera / Valle
Tipo de mampostería	TM	Simple / Semi confinada / Confinada
Conexión entre muros	CEM	Inexistente / Trabazón de muros / Columnas
Estado de muros	EM	Daño severo / Daño moderado / Daño inexistente
Características del muro	CM	Peligrosas / Inadecuadas / Adecuadas
Material de la cubierta	MC	Asbesto cemento / Tejas de barro / Láminas poliméricas
Configuración de la cubierta	CC	Peligrosa / Inadecuada / Adecuada
Conexión de la cubierta con estructura	CCE	En muros / Cinta de amarre / Viga de amarre
Estado de la cubierta	EC	Daño severo / Daño moderado / Daño inexistente
Manejo de aguas de cubierta	MAC	Inexistente / Malo / Bueno

Los parámetros seleccionados ofrecen tres opciones de respuesta, cada una de las cuales puede reflejar diferentes valores relacionados con la vulnerabilidad de la estructura en cuestión. Con el fin de determinar efectivamente la incidencia de cada parámetro y su impacto en la vulnerabilidad del CER estudiado, y con el criterio ingenieril del evaluador del CER estudiado, un valor de 100% se asignará a aquellas respuestas que impliquen una vulnerabilidad crítica, mientras que un valor de 50% se asignará a aquellas respuestas que representen una vulnerabilidad considerable pero no crítica. Por último, un valor de 0% se asignará a las respuestas que reflejen vulnerabilidades no significativas o la ausencia de esta.

Como ejemplo, consideremos el parámetro "Estado de muros". Las posibles respuestas son "Daño severo", "Daño moderado" y "Daño inexistente". La respuesta "Daño severo" reflejará un 100%, del valor o peso del parámetro, para indicar una vulnerabilidad crítica en la estructura, mientras que "Daño moderado" reflejará un 50% y "Daño inexistente", como su nombre indica, reflejará un 0%.

6.2. FACTOR DE IMPORTANCIA O PONDERACIÓN DE LOS PARÁMETROS PROPUESTOS (AHP)

En este sistema estructural, se ha asignado un peso dinámico a cada uno de los parámetros elegidos mediante un Análisis Jerárquico (AHP por sus siglas en inglés) que considera la existencia o no de daños en la estructura y/o en la cubierta. Con este enfoque, para el presente estudio se han identificado tres escenarios diferentes. El primer escenario considera un daño severo presente en la estructura o en la cubierta estudiada, este tipo de daño se caracteriza por un deterioro significativo que pone en riesgo la estabilidad y seguridad de la edificación y de las personas en su interior, en este caso es requerida una evacuación inmediata para una intervención. El segundo escenario se origina a partir de la existencia de un daño moderado en la estructura o en la cubierta, este daño no es tan grave como para comprometer la estabilidad y seguridad de la edificación, pero sí es necesario llevar a cabo estudios o reparaciones para evitar un deterioro progresivo en el tiempo. Por último, el tercer escenario se refiere a la ausencia de daños en la estructura y cubierta, en este caso, la edificación se encuentra en buen estado y no requiere reparaciones inmediatas, no obstante, es importante seguir monitoreando regularmente su estado para detectar cualquier problema que pueda surgir en el futuro. Los escenarios mencionados se pueden apreciar en la Tabla 19.

Tabla 19. Pesos dinámicos de parámetros propuestos

PARÁMETROS	ESCENARIO 1	ESCENARIO 2	ESCENARIO 3
Ubicación del módulo	8,21%	9,80%	8,78%
Tipo de mampostería	5,01%	6,35%	5,99%
Conexión entre muros	8,21%	9,80%	9,95%
Estado de muros	21,52%	15,69%	11,07%
Características del muro	8,21%	14,57%	22,90%
Material de la cubierta	3,39%	4,13%	4,79%
Configuración de la cubierta	8,21%	9,80%	7,77%
Conexión de la cubierta con estructura	13,82%	11,48%	9,13%
Estado de la cubierta	21,52%	15,69%	11,07%
Manejo de aguas de cubierta	1,89%	2,70%	8,55%

Lo anterior se establece debido a que la propuesta de esta metodología es partir del hecho de que la presencia de un daño en la estructura o en la cubierta hace que el resto de los parámetros asuma un papel secundario, ya que la estructura muestra signos de deterioro que deben ser atendidos para evaluar adecuadamente el resto de los parámetros asociados a la vulnerabilidad de la edificación, es decir, la implementación de un escenario u otro dependerá de los daños encontrados o no en campo en el CER estudiado.

El Análisis Jerárquico o AHP por sus siglas en inglés, es una metodología que permite omitir algunas limitaciones de la mente humana, pues es complejo o incluso imposible comparar grandes grupos de variables a la vez. Esta herramienta lo permite mediante diferentes aplicaciones comparativas y matemáticas. Lo anterior se logra realizando una comparación entre pares de variables en una dimensión o característica dada, por ejemplo, resistencias de un concreto comparadas en el ámbito económico y/o ingenieril, aquí el ámbito sería la dimensión o característica dada.

Tabla 20. Escala de Saaty. (Saaty, 1987)

Escala numérica	Escala verbal	Descripción
1	Igual importancia.	Los dos elementos contribuyen igualmente a la propiedad o criterio.
3	El elemento es moderadamente más importante respecto al otro.	El juicio y la experiencia previa favorecen a un elemento frente al otro.
5	El elemento es fuertemente más importante respecto al otro.	El juicio y la experiencia previa favorecen fuertemente a un elemento frente al otro.
7	La importancia del elemento es muy fuerte respecto al otro.	Un elemento domina fuertemente.
9	La importancia del elemento es extrema respecto al otro.	Un elemento domina al otro con el mayor orden de magnitud posible.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes.	
Incrementos 0,1	Valores intermedios entre incrementos (utilice esta escala si cree que su valoración necesita un alto grado de precisión).	
Inversos $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{1}{5}, \frac{1}{6}, \frac{1}{7}, \frac{1}{8}, \frac{1}{9}$	Se utiliza cuando el segundo elemento es mayor en el criterio a comparar.	

En el caso del presente estudio se planteó un AHP para los parámetros mostrados en la Tabla 18 en una única dimensión que es la vulnerabilidad del CER estudiado, empleando como guía lo propuesto por Toskano Hurtado, (2005) que a su vez fue basado en lo que originalmente

postuló Saaty, (1987). Consiste en el planteamiento de una matriz que enfrenta las variables mediante la asignación de un valor comparativo según lo que se puede ver en la Tabla 20 gracias al criterio de un experto o profesional en el área de estudio que determine, comparativamente, qué variable es más importante según el caso y en qué nivel, ya que es posible determinar cuántas veces es más o menos importante una variable que otra.

El planteamiento de la matriz comparativa del presente estudio se puede ver a continuación en la Tabla 21 en la cual su diagonal principal debe ir diligenciada con números 1, puesto que comparar cada variable consigo misma resulta en una comparación de igual importancia. El resto de variables se comparará tomando primero el valor de la fila que se esté analizando y comparando una a una dicha variable con las variables de cada columna, teniendo en cuenta que, cuando la comparación sea contraria, se deberá ingresar el inverso del valor indicado inicialmente, es decir, si se compara A con B diciendo que A es moderadamente más importante que B con un número 3, luego el comparar B con A deberá implicar el uso de $1/3$ como inverso del valor usado originalmente en la comparación.

Una vez realizada la comparación de todas las variables de la matriz se procede a sumar cada una de las columnas de esta, para, posteriormente, construir una matriz normalizada gracias a la división de los valores de la matriz original por sus respectivas sumas de columna.

Posteriormente se procede a realizar el cálculo del vector promedio con la media de cada una de las filas de la matriz normalizada multiplicada por la matriz original. Con el cálculo de la razón de consistencia, se puede determinar si el análisis planteado es o no válido según el tamaño de matriz empleado.

Finalmente, tras comprobar la validez del análisis planteado se procede con la multiplicación de la matriz original por sí misma para luego hallar la suma de cada una de sus filas por separado y determinar, gracias a la división de estos valores de suma por el valor total de la suma, el peso de cada una de las variables según la comparación planteada. Esta última

multiplicación deberá repetirse hasta que los valores de los pesos de cada variable converjan en un valor determinado.

A manera de ilustración se muestra a continuación el procedimiento completo y los valores empleados en el segundo escenario, esto es, una estructura con presencia de daños leves. Inicialmente se plantea la matriz de pesos original que incluye la comparación variable a variable realizada con el planteamiento de Saaty, (1987) y la suma de cada una de las columnas de dicha matriz tal como se ve en la Tabla 21.

Tabla 21. Matriz de comparación o de pesos. Escenario 2

MATRIZ DE PESOS										
VARIABLES	UM	TMS	CEM	EM	CM	MC	AC	CCE	EC	MAC
UM	1	2	1	0,5	0,5	3	1	1	0,5	5
TM	0,5	1	0,5	0,5	0,33	2	0,5	0,5	0,5	4
CEM	1	2	1	0,5	0,5	3	1	1	0,5	5
EM	2	2	2	1	2	3	2	1	1	3
CM	2	3	2	0,5	1	4	2	1	0,5	6
MC	0,33	0,5	0,33	0,33	0,25	1	0,33	0,33	0,33	3
CC	1	2	1	0,5	0,5	3	1	1	0,5	5
CCE	1	2	1	1	1	3	1	1	1	3
EC	2	2	2	1	2	3	2	1	1	3
MAC	0,2	0,25	0,2	0,33	0,17	0,33	0,2	0,33	0,33	1
SUMA	11,03	16,75	11,03	6,17	8,25	25,33	11,03	8,17	6,17	38

Tabla 22. Matriz normalizada. Escenario 2

MATRIZ NORMALIZADA											
VARIABLES	UM	TMS	CEM	EM	CM	MC	AC	CCE	EC	MAC	PROMEDIO
UM	0,091	0,119	0,091	0,081	0,061	0,118	0,091	0,122	0,081	0,132	0,0987
TM	0,045	0,060	0,045	0,081	0,040	0,079	0,045	0,061	0,081	0,105	0,0644
CEM	0,091	0,119	0,091	0,081	0,061	0,118	0,091	0,122	0,081	0,132	0,0987
EM	0,181	0,119	0,181	0,162	0,242	0,118	0,181	0,122	0,162	0,079	0,1550
CM	0,181	0,179	0,181	0,081	0,121	0,158	0,181	0,122	0,081	0,158	0,1445
MC	0,030	0,030	0,030	0,054	0,030	0,039	0,030	0,041	0,054	0,079	0,0418
CC	0,091	0,119	0,091	0,081	0,061	0,118	0,091	0,122	0,081	0,132	0,0987
CCE	0,091	0,119	0,091	0,162	0,121	0,118	0,091	0,122	0,162	0,079	0,1157
EC	0,181	0,119	0,181	0,162	0,242	0,118	0,181	0,122	0,162	0,079	0,1550
MAC	0,018	0,015	0,018	0,054	0,020	0,013	0,018	0,041	0,054	0,026	0,0278

Posterior a lo anterior se construye la matriz normalizada a partir de los datos obtenidos con los valores de la matriz de pesos y la suma de cada columna, dividiendo uno a uno los valores de la matriz original por la suma de la columna en que se esté trabajando, para, posteriormente, calcular el promedio de las filas de esta nueva matriz tal como se puede ver en la Tabla 22.

Tras lo anterior se procede a calcular la matriz promedio, producto del cálculo de la multiplicación de la matriz de pesos original por el vector formado por los promedios anteriormente calculados, tal como se ve en la Tabla 23.

Tabla 23. Matriz promedio. Escenario 2

MATRIZ PROMEDIO	
	1,0320
	0,6681
	1,0320
	1,6440
	1,5341
	0,4340
	1,0320
	1,2036
	1,6440
	0,2830

Tabla 24. Cálculo de índices. Escenario 2

VARIABLE	DESCRIPCIÓN	VALOR
n	Número de variables analizadas	10
nmax (λ_{max})	Número máximo de variables	10,5066
CI (IC)	Índice de consistencia	0,056284145
RI (AI)	Índice de consistencia aleatorio	1,584
CR (RC)	Razón de consistencia	3,55%

Luego del cálculo de la matriz promedio se realiza el cálculo del índice de consistencia, el índice de consistencia aleatorio y la razón de consistencia para determinar si los valores empleados en la comparación de las variables son o no coherentes según el número de variables analizadas, siendo esta última variable, la razón de consistencia, contrastada contra un porcentaje máximo de 5% para hasta tres variables analizadas, con un máximo de 9% para hasta

4 variables analizadas y con hasta un 10% para 5 o más variables analizadas según lo planteado por Saaty, (1987). Tal como se puede ver en la Tabla 24, el análisis planteado es consistente, dado que la razón de consistencia para el ejercicio planteado con 10 variables (n=10) es menor al 10% y pueden ser empleados los resultados de este.

Tabla 25. Iteración 1. Escenario 2

ITERACIÓN 1												
VARIABLES	UM	TMS	CEM	EM	CM	MC	AC	CCE	EC	MAC	SUMA	%
UM	10	16,3	10	7,4	7,3	25,7	10	9,2	7,4	46	149,17	0,10
TM	6,6	10	6,6	4,9	5,1	15,7	6,6	5,8	4,9	28	94,32	0,06
CEM	10	16,3	10	7,4	7,3	25,7	10	9,2	7,4	46	149,17	0,10
EM	17,6	28,3	17,6	10	11,9	43	17,6	14	10	71	240,97	0,16
CM	15	25,5	15	10,3	10	40	15	13,8	10,3	72	227,10	0,15
MC	4,4	6,5	4,4	3,2	3,3	10	4,4	3,8	3,2	17,5	60,63	0,04
CC	10	16,3	10	7,4	7,3	25,7	10	9,2	7,4	46	149,17	0,10
CCE	12,6	19,3	12,6	8	9,4	30	12,6	10	8	50	172,47	0,11
EC	17,6	28,3	17,6	10	11,9	43	17,6	14	10	71	240,97	0,16
MAC	3	4,4	3	2	2,5	6,6	3	2,3	2	10	38,82	0,03

Tabla 26. Iteración 2. Escenario 2

ITERACIÓN 2												
VARIABLES	UM	TMS	CEM	EM	CM	MC	AC	CCE	EC	MAC	SUMA	%
UM	1145	1798	1145	771,2	834,7	2789	1145	975,3	771,2	4778	16151,23	0,10
TM	741,5	1167	741,5	499,2	539,3	1811	741,5	632,5	499,2	3105	94,32	0,06
CEM	1145	1798	1145	771,2	834,7	2789	1145	975,3	771,2	4778	149,17	0,10
EM	1826	2868	1826	1242	1334	4455	1826	1564	1242	7660	240,97	0,16
CM	1701	2667	1701	1150	1244	4138	1701	1450	1150	7088	227,10	0,15
MC	481,6	758,5	481,6	324,3	350,1	1177	481,6	411	324,3	2020	60,63	0,04
CC	1145	1798	1145	771,2	834,7	2789	1145	975,3	771,2	4778	149,17	0,10
CCE	1337	2105	1337	906,2	974,2	3268	1337	1145	906,2	5617	172,47	0,11
EC	1826	2868	1826	1242	1334	4455	1826	1564	1242	7660	240,97	0,16
MAC	314,5	496,7	314,5	213,1	228,2	771,5	314,5	269,9	213,1	1329	38,82	0,03

Finalmente, tras determinar la consistencia de la comparación planteada, se procede con las iteraciones entre la multiplicación de la matriz original por sí misma y, nuevamente, la multiplicación de la matriz resultado por sí misma hasta hallar una convergencia de los pesos de

cada variable mediante la división de la suma de cada una de las filas de la matriz por la suma del total de la adición de valores de la matriz resultado, es decir, cada valor de suma de la fila de la iteración se divide por la suma de esta columna de suma nueva generada, tal como se puede ver en la Tabla 25 y en la Tabla 26, en donde se puede apreciar la convergencia de la columna % que indica el peso asignado a la variable según la comparación propuesta.

El anterior procedimiento fue realizado con los 3 escenarios planteados, obteniendo así el resultado que se puede ver en la Tabla 19 y en la Figura 77, recordando que el escenario 1 hace referencia al protagonismo de la existencia de daños severos en la estructura o en la cubierta, el escenario 2 refleja la importancia de las variables cuando existen daños moderados en la estructura o cubierta del CER analizado y el escenario 3 muestra la importancia de las variables estudiadas ante la ausencia de daños en la estructura y en la cubierta estudiada.

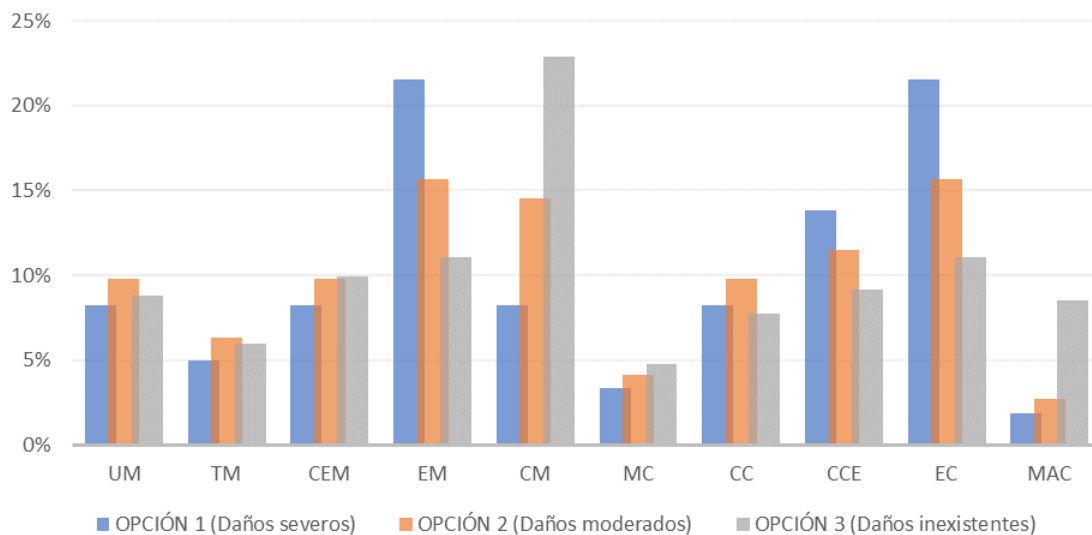


Figura 77. Resultado del AHP

6.3. DESCRIPCIÓN DE PARÁMETROS PROPUESTOS

Los parámetros descritos a continuación son producto de propuestas generadas a partir de necesidades o particularidades identificadas en campo y a partir de experiencias y conocimientos sobre el comportamiento de las tipologías estructurales aquí estudiadas en conjunto con sus componentes y complementos.

A continuación, serán descritos uno a uno los parámetros propuestos con ilustraciones que permitan un completo entendimiento de estos.

6.3.1. Ubicación del módulo

Este parámetro tiene su origen en la vulnerabilidad generada por la amenaza a la que se ve expuesta una estructura por la ubicación en los diferentes puntos de una montaña o formación geológica, puesto que, según las diferentes posibilidades encontradas en campo, una u otra ubicación repercutirá de manera negativa o positiva en la vulnerabilidad de la edificación. Para este parámetro se definieron 3 posibles respuestas, ubicación en ladera de montaña, ubicación en cresta de montaña y ubicación en el valle, siendo la primera de estas la que otorgaría un mayor puntaje de vulnerabilidad a la evaluación realizada, la segunda un puntaje intermedio y la tercera no daría puntaje alguno en este parámetro. En la Figura 78 se puede apreciar una ilustración, de izquierda a derecha, de la ubicación del CER en ladera, en cresta y en valle.

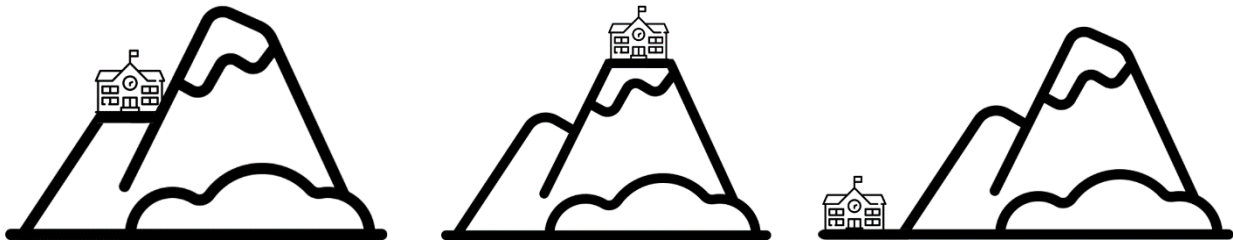


Figura 78. Parámetro de ubicación del módulo. Imagen adaptada de Flaticon.com

La importancia de este parámetro se da por la amenaza latente que representa un eventual movimiento en masa, desatado por un evento sísmico, que afecte el terreno sobre el cual se emplaza la estructura del CER evaluado o a la estructura misma.

6.3.2. Tipo de mampostería

Producto de la visita realizada en campo descrita en el Capítulo 3 y de posteriores inspecciones realizadas en campo por el grupo investigativo, fue posible determinar que la tipología estructural más utilizada en los CERs de Antioquia es la mampostería, siendo la simple y la semi confinada las más frecuentemente empleadas, caracterizadas por ser tipologías usadas de manera informal, generalmente sin los materiales adecuados y sin las prácticas necesarias

para garantizar un comportamiento óptimo de la estructura. Este parámetro aportará un mayor puntaje a la vulnerabilidad de la estructura estudiada a medida que se identifique la ausencia de elementos propios de una mampostería confinada, considerando como mampostería simple (caso más desfavorable) a aquella que carece de la totalidad de elementos estructurales como vigas y columnas, como mampostería semi confinada (caso intermedio) a aquella estructura compuesta por algunos elementos estructurales como vigas o columnas, y, finalmente, como mampostería confinada (caso favorable) a la estructura que cuenta con la totalidad de elementos estructurales que componen esta tipología.



Figura 79. Parámetro de tipo de mampostería. Imagen de elaboración propia

En la Figura 79 se puede apreciar a la izquierda un ejemplo de mampostería simple con una viga superior que dota a la estructura de una restricción lateral que evita que el muro se comporte enteramente como voladizo, esta tipología estructural es a la que se hace referencia cuando se menciona mampostería semi confinada, mientras que a la derecha de la misma figura se puede apreciar un ejemplo de mampostería simple, la cual, a diferencia de la semi confinada no tendría la capacidad de resistir la misma magnitud de fuerzas horizontales, es por este motivo que dentro de la tipología estructural de mampostería, la semi confinada será la que aporte una menor vulnerabilidad a la estructura en comparación con la mampostería simple y, tal como es de esperar, la mampostería confinada será la que no aporte vulnerabilidad en este parámetro.

6.3.3. Conexión entre muros

Este parámetro obedece a la determinación de si la estructura posee o no la capacidad de mostrar una respuesta integral, en dos direcciones, y no individual ante la llegada de un sismo o de otra carga fuera del plano, esto ocurre por el efecto de elementos estructurales verticales como columnas, de la trabazón la mampostería en los muros que la componen o si por el contrario, la edificación del CER estudiado no posee dicha capacidad, en este orden de ideas, la presencia de columnas en la estructura evaluada repercutirá positivamente en la vulnerabilidad del sismo, la trabazón de la mampostería de sus muros lo hará también pero en menor medida, mientras que la ausencia de estos dos sistemas tendrá efectos negativos en el puntaje de la evaluación de la vulnerabilidad sísmica del CER.



Figura 80. Parámetro de conexión entre muros. Imagen de elaboración propia

En la Figura 80 se puede apreciar, de izquierda a derecha, la presencia de columnas en un CER, de trabazón en la mampostería de los muros de otra estructura y la ausencia de trabazón en la mampostería de sus muros, estos tres casos se traducen, respectivamente, en el escenario más favorable, el intermedio y el menos favorable de cara a la vulnerabilidad sísmica del CER. De igual manera, y en este orden, será la contribución de estas respuestas para este parámetro al puntaje de la evaluación mediante la metodología propuesta en el presente estudio.

6.3.4. Estado de muros

Este parámetro permite considerar el nivel de deterioro o daño en los muros que conforman la escuela. En este caso se consideran tres escenarios: Daño severo, daño moderado e inexistencia de daños. La presencia de daños en la estructura hace que la vulnerabilidad sea más alta, y que, ante la existencia de otras falencias, se aumente considerablemente, debido a que ya existe uno o varios puntos por donde la estructura falló, y es a partir de estos por donde pueden seguir avanzando los daños hasta llevar al colapso parcial o total a la estructura.

Los daños que presenta la estructura pueden estar asociados a factores naturales o antrópicos externos o propios de la misma estructura. Como se puede esperar, la presencia de daños severos repercutirá de manera negativa a la evaluación de la vulnerabilidad del CER, pero no en la misma magnitud que la presencia de daños moderados, mientras que la inexistencia de daño en la estructura no afectará este puntaje.

Tabla 27. Propuesta para descripción de respuestas del parámetro de estado de muros

DAÑO	DESCRIPCIÓN
Inexistente	<ul style="list-style-type: none"> No es posible apreciar fisuras, grietas o desprendimientos en ningún componente de la estructura.
Moderado	<ul style="list-style-type: none"> Presencia de fisuras, grietas y/o desprendimientos. Presencia de humedad que genere desprendimientos de material.
Severo	<ul style="list-style-type: none"> Colapso parcial o total de algunos elementos que supere el 50% de afectación de su superficie o longitud. Grietas o fisuras generadas por afectación a terreno cercano.

Además de lo anterior, este parámetro tiene la particularidad de que su propia calificación o respuesta afecta al peso o ponderación del resto de parámetros planteados, ya que la propuesta del presente estudio es que el resto de estos parámetros tomen una mayor importancia solo si la estructura no muestra daños existentes, esto fue realizado mediante el AHP mostrado en el Capítulo 6.2 planteado con un escenario diferente según la respuesta de este parámetro y del parámetro del estado de la cubierta. En la Tabla 27 se muestra una propuesta para clasificar el nivel de severidad de los daños en los muros.

6.3.5. Características del muro

Esta variable fue propuesta con base en la adaptación de lo postulado por Giordano et al., (2020) y en lo analizado en el Capítulo 4, cuenta con la recopilación de las características básicas del muro inherentes a su geometría y carga y su comparación en cuanto a cómo son de significativas de cara a la capacidad sísmica del muro en términos de PGA, tal como se pudo ver en el Capítulo 4.3.

En la Tabla 28 es posible observar las posibles respuestas para el parámetro de Características del muro que engloban sus particularidades geométricas y de carga como espesor, altura, longitud y carga que soporta el muro analizado. Partiendo de la hipótesis propuesta por Giordano et al., (2020) que indica que la vulnerabilidad de la estructura será igual a la del muro más vulnerable. Los umbrales y explicaciones expuestos en la misma tabla son el resultado de lo analizado en el Capítulo 4.3.

Tal como se puede suponer, características del muro categorizadas como Peligrosas darán lugar a un mayor aporte a la vulnerabilidad de la estructura que aquellas categorizadas como Inadecuadas, mientras que las nombradas Adecuadas no aportarán vulnerabilidad al puntaje de la evaluación final. En la Tabla 29 se pueden ver las diferentes condiciones propuestas para que se responda al parámetro de Características del muro en función del aporte de vulnerabilidad de las particularidades expuestas anteriormente.

Tabla 28. Respuestas para el parámetro Características del muro

CARACTERÍSTICAS DEL MURO	UMBRAL	EXPLICACIÓN
Adecuadas	$e \geq 15$ cm	Valor medio encontrado
	$h \leq 2,4$ m	Valor medio encontrado
	$B \leq 10$ m	Valor medio encontrado
	Carga dada por un segundo nivel	Valor óptimo
Inadecuadas	$10 \text{ cm} < e < 15$ cm	Reducción en un 30 % del PGA requerido para DS4
	$2,4 < h \leq 2,8$ m	Reducción en un 15 % del PGA requerido para DS4
	$10 \text{ m} < B \leq 15$ m	Reducción en un 10% del PGA requerido para el DS1
	Carga dada por una cubierta	Valor medio encontrado

Peligrosas	e < 10 cm	Reducción en un 45 % del PGA requerido para DS4
	h > 2,8 m	Reducción en un 20 % del PGA requerido para DS4
	B > 15 m	Reducción en un 20% del PGA requerido para el DS1
	Sin carga sobre muro	Valor peligroso

e: espesor del muro, h: altura del muro; B: longitud del muro.

Además de lo mencionado, este parámetro tiene la particularidad de ser el que toma mayor importancia ante la ausencia de daños en la estructura y en la cubierta, resaltando la importancia de la geometría y las cargas impuestas al muro.

Tabla 29. Condiciones para respuesta del parámetro Características del muro

RESPUESTA	CONDICIÓN
Características del muro Peligrosas	Al menos 1
Características del muro Inadecuadas	Al menos 2
Características del muro Adecuadas	Si no cumple con dos anteriores

6.3.6. *Material de la cubierta*

Este parámetro tiene como posible respuesta láminas de asbesto cemento, tejas de barro y láminas poliméricas, siendo la primera de estas la que supone una mayor vulnerabilidad para el CER evaluado ya que no solo a nivel estructural puede llegar a presentar un peligro para las personas que ingresan al Centro educativo diariamente, sino que su material, según conocimiento científico establecido, está relacionado con la aparición de diversos tipos de cáncer en seres humanos (American Cancer Society, 2015), mientras que las tejas de barro suponen un problema solo estructural debido a que su mala implementación puede dar origen a malos manejos de aguas lluvias y su desprendimiento puede generar daños en la estructura y en las personas que se encuentran en su interior o alrededores. Finalmente, la solución de láminas poliméricas ha apuntado a ser la tecnología del futuro, ya que permite, en múltiples situaciones, utilizar materiales reciclados que, según su configuración, pueden tener iguales o mejores características y prestaciones que las soluciones empleadas tradicionalmente.



Figura 81. Parámetro de material de cubierta. Imagen de elaboración propia

En la Figura 81 se puede apreciar, de izquierda a derecha, como se ven, normalmente, cubiertas compuestas por láminas de asbesto cemento, tejas de barro y láminas poliméricas, suponiendo, en este mismo orden y de manera decreciente, su aporte al puntaje de la vulnerabilidad de la edificación evaluada.

6.3.7. Configuración de la cubierta

A raíz de lo encontrado en campo fue necesario proponer el parámetro de Configuración de la cubierta, ya que en un gran número de los CERs se encontraron diversos casos en los cuales la vulnerabilidad de la edificación evaluada se veía afectada por estas variaciones, puesto que, ante la llegada de una fuerza horizontal a la estructura, su comportamiento según la configuración estudiada en este parámetro variará considerablemente debido a la condición de apoyo de los voladizos existentes de la cubierta y a la existencia y dirección del amarre de la estructura de dicha cubierta.

Según lo anterior, y de manera análoga a lo propuesto en Capítulos anteriores, se propuso una serie de características propias de una configuración adecuada, inadecuada y peligrosa, siendo las características asociadas a una configuración peligrosa aquellas que aportarán un mayor puntaje a la vulnerabilidad a la estructura estudiada, las asociadas a una configuración inadecuada aquellas que aportarán puntaje a la vulnerabilidad de la estructura

estudiada pero no en el mismo grado que la categoría anterior y las asociadas a una configuración adecuada aquellas que no aportarán puntaje a la vulnerabilidad de la estructura estudiada.

Tabla 30. Respuestas para el parámetro Configuración de la cubierta

CONFIGURACIÓN DE LA CUBIERTA	CARACTERÍSTICAS	EXPLICACIÓN
Adecuada	Amarre de voladizos significativos con cercha anclada o viga y columnas ancladas	Transmisión efectiva de carga del voladizo de la cubierta a la estructura de la edificación o al suelo
	Amarre longitudinal y transversal de la estructura de la cubierta	Distribución uniforme de la carga de la cubierta sobre su estructura
Inadecuada	Amarre de voladizos significativos con viga y columnas apoyadas	Transmisión efectiva de carga del voladizo de la cubierta al suelo, pero no restringida ante fuerzas externas
	Amarre longitudinal o transversal de la estructura de la cubierta	Distribución uniforme, pero mejorable, de la carga de la cubierta sobre su estructura
Peligrosa	Amarre de voladizos significativos inexistente	Ausencia de transmisión efectiva de carga del voladizo de la cubierta
	Ausencia de amarre longitudinal o transversal de la estructura de la cubierta	Ausencia de estructura auxiliar para el soporte de la cubierta

Las características que debe tener una estructura para ser considerada dentro de las categorías propuestas para el parámetro de Configuración de la cubierta se pueden apreciar en la Tabla 30. En la Tabla 31 están dispuestas las condiciones que deben cumplir estas características para considerar a la estructura dentro de dichas categorías de este parámetro.

Tabla 31. Condiciones para respuesta del parámetro Configuración de la cubierta

RESPUESTA	CONDICIÓN
Configuración de la cubierta Peligrosa	Al menos 1
Configuración de la cubierta Inadecuada	Al menos 1
Configuración de la cubierta Adecuada	Si no cumple con las dos anteriores



Figura 82. Amarre de voladizos significativos. Parámetro Configuración de la cubierta. Imagen de elaboración propia



Figura 83. Amarre estructura de la cubierta. Parámetro Configuración de la cubierta. Imagen de elaboración propia

Como ejemplos de lo mencionado en la anterior tabla, es posible observar en la Figura 82 de izquierda a derecha un amarre de voladizo significativo mediante cercha anclada a vigas de la izquierda y mediante vigas y columnas apoyadas. En la Figura 83 se puede observar un amarre longitudinal transversal de la estructura de la cubierta y otro únicamente transversal.

6.3.8. Conexión de la cubierta con estructura

La importancia de este parámetro radica en cómo la cubierta transmite la carga de su peso a la estructura, puesto que una transmisión distribuida mediante un elemento estructural horizontal como una viga o, por lo menos, una fase compuesta por un material colocado a lo largo del muro, como una cinta de amarre, impactará de manera positiva en la vulnerabilidad de la edificación estudiada por la prevención de la imposición de una carga puntual en un muro que

no está preparado para dicho tipo de esfuerzo. Este parámetro tiene 3 posibles respuestas, conexión en muros, con cinta de amarre y con viga de amarre, siendo esta primera opción la que aportaría mayor puntaje a la vulnerabilidad del CER estudiado, la segunda aportaría medianamente a dicha vulnerabilidad y la tercera, por ser la opción ideal, no aportará vulnerabilidad a la evaluación realizada.

En la Figura 84 es posible observar un ejemplo de las posibles respuestas de este parámetro, a la izquierda un apoyo de cubierta directamente sobre muro, mostrando también cómo se vería un daño en la estructura generado por esta característica, en la imagen central se ve una cubierta apoyada sobre una cinta de amarre, en este caso de madera y concreto y en la imagen de la derecha se puede apreciar cómo se ve una cubierta apoyada sobre una viga de amarre.



Figura 84. Parámetro de Conexión de la cubierta con la estructura. Imagen de elaboración propia

6.3.9. Estado de la cubierta

Este parámetro, al igual que el Estado de muros puede contar con la respuesta de daño severo, daño moderado e inexistencia de daños y fue tenido en cuenta por las mismas razones que el parámetro mencionado, puesto que la existencia de daños en la cubierta, al ser una estructura que siempre está sobre las personas que ingresan al CER podría provocar tragedias significativas sin lugar a una preparación o reacción adecuada.

Los daños que presenta la cubierta pueden estar asociados a factores naturales o antrópicos externos o propios de la misma estructura y, como se puede esperar, de manera similar al parámetro de Estado de muros, la presencia de daños severos repercutirá de manera negativa a la evaluación de la vulnerabilidad del CER, pero no en la misma magnitud que la presencia de daños moderados, mientras que la inexistencia de daño en la estructura no afectará este puntaje. Además de lo anterior, este parámetro tiene también la particularidad de que su propia calificación o respuesta afecta al peso del resto de variables, ya que la propuesta del presente estudio es que el resto de los parámetros propuestos tomen una mayor importancia solo si la cubierta no muestra daños existentes.

En la Tabla 32 se muestra una propuesta para clasificar el nivel de severidad de los daños en la cubierta.

Tabla 32. Propuesta para descripción de respuestas del parámetro de estado de cubierta

DAÑO	DESCRIPCIÓN
Inexistente	<ul style="list-style-type: none"> No es posible identificar desprendimientos o daño en los elementos que componen a la cubierta ni a la cubierta misma.
Moderado	<ul style="list-style-type: none"> Presencia de goteras por desplazamiento de láminas o tejas. Presencia de grietas o fisuras en estructura de cubierta o en la cubierta misma.
Severo	<ul style="list-style-type: none"> Colapso parcial o total de algunos elementos de la cubierta. Fracturas o daño irreparable en la estructura de la cubierta o en la cubierta misma.

6.3.10. Manejo de aguas de cubierta

Este parámetro fue propuesto por la repercusión que puede llegar a tener un mal manejo de aguas sobre la estructura de un CER, que con el impacto del agua lluvia canalizada por una cubierta y dispuesta sin control sobre el terreno, puede llegar a generar cambios en la masa de suelo sobre la que se emplaza la edificación estudiada, provocando, posiblemente, asentamientos diferenciales o no tenidos en cuenta al momento del diseño de la estructura, es por esto que una estructura sin un sistema de manejo de aguas impactará negativamente el puntaje de la evaluación de la vulnerabilidad del CER estudiado.



Figura 85. Parámetro de Manejo de aguas de cubierta. Imagen de elaboración propia

En la Figura 85 se puede apreciar, de izquierda a derecha, una edificación sin estructura para el manejo de aguas lluvias, una estructura inadecuada pero existente para el manejo de aguas lluvias y una estructura completa para el manejo de aguas lluvias.

6.4. EVALUACIÓN CON MODELO DE PRIORIZACIÓN

El modelo planteado en el presente estudio, basado en los parámetros propuestos y en el análisis de importancia realizado, fue implementado en la evaluación de 12 Centros Educativos Rurales, ubicados en el departamento de Antioquia, dando como resultado los valores que se pueden ver más adelante, en donde también se compara dicho valor con el resultado de la misma evaluación de vulnerabilidad realizada mediante la metodología propuesta por Benedetti & Petrini, (1982).

Tabla 33. Nivel de vulnerabilidad, clasificación. Sacado de Benedetti & Petrini, (1982)

NIVEL DE VULNERABILIDAD	VULNERABILIDAD
$0 \leq \% \text{ Vulnerabilidad} < 20 \%$	Baja (verde)
$20 \leq \% \text{ Vulnerabilidad} < 40 \%$	Media (amarillo)
$40 \leq \% \text{ Vulnerabilidad} < 100 \%$	Alta (rojo)

Tabla 34. Nivel de vulnerabilidad, clasificación. Propuesta del presente estudio

NIVEL DE VULNERABILIDAD	VULNERABILIDAD
0 ≤ % Vulnerabilidad < 20 %	Baja (verde)
20 ≤ % Vulnerabilidad < 30 %	Media (amarilla)
30 ≤ % Vulnerabilidad < 40 %	Media – Alta (naranja)
40 ≤ % Vulnerabilidad ≤ 100 %	Alta (rojo)

En la Tabla 33 se puede apreciar la clasificación para el puntaje de vulnerabilidad propuesto por Benedetti & Petrini, (1982), en la Tabla 34 se puede ver la clasificación para este mismo puntaje propuesta en el presente estudio y en la Tabla 35 se puede apreciar el resultado de la evaluación planteada.

Tabla 35. Evaluación a 12 CERs de Antioquia

CENTRO EDUCATIVO RURAL	UBICACIÓN	BENEDETTI Y PETRINI	PROPUESTA DEL PRESENTE ESTUDIO
El Morro	Amagá	53,268	63,141
La Enea	San Vicente	46,732	68,482
Campo Alegre	Ebéjico	53,268	60,625
La Renta	Ebéjico	36,275	64,509
Pedro Nel Durango PPAL	Apartadó	19,281	11,549
El Sesenta	Caldas	24,183	29,865
La Casita	Anorí	17,647	21,539
Gabriela Mistral	Angostura	17,647	20,729
José Ignacio Botero	Santuario	47,386	75,787
Trinidad Nechí	Amagá	29,412	35,906
JFK	Sopetrán	37,255	79,335
El Rodeo	San Jerónimo	19,935	47,524

Tal como se pudo apreciar en la tabla anterior, la metodología propuesta en el presente estudio tiene la capacidad de identificar satisfactoriamente aquellas edificaciones con vulnerabilidad alta y moderada según lo planteado por Benedetti & Petrini, (1982). El resto de las evaluaciones realizadas serán cotejadas posteriormente con la opinión del ingeniero que realizó la inspección visual con el fin de unificar conceptos.

7. APLICACIÓN DE MODELO DE PRIORIZACIÓN DE INTERVENCIONES

Previa a la aplicación y comparación de la metodología propuesta en el presente estudio, se realizó una evaluación de la vulnerabilidad de algunos CERs gracias a profesionales (los autores del presente estudio) con conocimientos y experiencia en patologías, funcionamiento de las estructuras, flujo de fuerzas en la misma, entre otros, que tuvieron la oportunidad de realizar una visita presencial a la locación del CER en cuestión, siendo esto un factor decisivo en cuanto a la percepción de vulnerabilidad que se pueda llegar a tener de una estructura. El planteamiento mostrado continuación permitirá comparar, de forma cualitativa, gracias a las categorías de calificación de la vulnerabilidad propuesta, la evaluación realizada por un ingeniero preparado y por la metodología propuesta en el presente artículo.

7.1. EVALUACIÓN CON PROPUESTA DE ESTE ESTUDIO Y COMPARACIÓN

Con el fin de comparar la evaluación empírica de la vulnerabilidad de los CERs visitados en el municipio de Jericó con la metodología para evaluar la vulnerabilidad de edificaciones propuesta en el presente estudio y con una ya establecida como la propuesta por Benedetti & Petrini, (1982), se procedió a realizar los cálculos requeridos para un resultado que se puede ver a continuación en la Tabla 36, recordando que la propuesta del presente estudio tiene su propia calificación de rangos para la vulnerabilidad del CER estudiado (ver Tabla 34).

Tabla 36. Comparación de evaluación de vulnerabilidad empíricamente, con metodología propuesta en este estudio y con la propuesta por *Benedetti & Petrini, (1982)*

CENTRO EDUCATIVO RURAL	EVALUACIÓN EMPÍRICA	BENEDETTI Y PETRINI	PROPUESTA DEL PRESENTE ESTUDIO
Monseñor Augusto Trujillo Arango	Verde	33,333	18,836
Álvaro Ardulio Naranjo	Roja	61,111	56,259
Estrella Vieja	Roja	41,176	44,300
Avelino Marín	Amarilla	36,275	27,962
Santiago Santamaría	Verde	25,490	23,294
La Pradera	Roja	45,425	47,203
Escuela Nueva La Leona	Verde	22,876	20,729
Escuela La Cascada Normal	Amarilla	20,261	23,183

Tal como se puede apreciar en la tabla anterior y en la que se evaluó los 12 CERs de Antioquia en ubicaciones diferentes a Jericó (ver Tabla 35), la metodología propuesta en el presente estudio muestra coincidencias cuando la evaluación da como resultado una clasificación de la vulnerabilidad alta, no obstante, cuando se compara con la evaluación empírica realizada por expertos, la propuesta del presente estudio muestra un comportamiento más conservador, es decir, ante escenarios valorados como favorables por expertos, la propuesta del presente estudio considera valoraciones moderadas de la vulnerabilidad de la edificación.

En este estudio, se lleva a cabo una evaluación exhaustiva que tiene en cuenta tres escenarios distintos relacionados con la existencia de daños en la estructura y/o en la cubierta. La inclusión de estos tres escenarios permite una comprensión más profunda de la vulnerabilidad de la estructura. Al evaluar una estructura con un parámetro simple que no tiene en cuenta la presencia de daños no se obtiene una representación precisa de su vulnerabilidad, ya que los daños pueden afectar significativamente su capacidad de resistencia. Por lo tanto, la metodología propuesta en este estudio ofrece una evaluación más precisa y rigurosa de la estructura y su vulnerabilidad.

8. CONCLUSIONES

Este trabajo se ha enfocado en realizar una primera aproximación al desarrollo de una metodología de evaluación de la vulnerabilidad sísmica de Centros Educativos Rurales, CERs, cuya tipología constructiva más frecuente es la mampostería. Para ello, se ha optado por desarrollar un índice de vulnerabilidad a partir de información obtenida directamente en campo de las estructuras seleccionadas como caso de estudio. El planteamiento inicial de la metodología se realizó a partir de lo propuesto a nivel internacional para problemáticas similares, mediante la postulación de un formulario que tuviese en cuenta las particularidades de la región estudiada, y su implementación en campo, detallada en el Capítulo 3. Posteriormente, se actualizó la implementación de este formulario mediante un aplicativo móvil desarrollado en un proyecto de investigación liderado por la Universidad de Medellín, la Universidad EIA y la Universidad Nacional de Colombia. Dicho aplicativo móvil permite consignar toda la información recopilada en campo y generar de manera directa una base de datos que permite caracterizar las tipologías constructivas de los CERs en el departamento de Antioquia. Para desarrollar la metodología propuesta en este trabajo, se realizó una revisión del estado del arte, la cual permitió identificar variables que pueden ser comunes y que se optó por conservar en la presente metodología junto con otras variables que son propias de las características de los Centros Educativos Rurales de Colombia. Para calibrar la metodología propuesta, se seleccionó una zona de estudio en la cual se han registrado daños debidos a eventos sísmicos. El análisis de la sismicidad histórica y su efecto sobre las estructuras que son objeto de estudio de este trabajo, permiten concluir que la metodología es útil para hacer predicciones globales y se constituye en una plataforma para la toma de decisiones por parte de entidades encargadas de la planeación, mitigación y atención de los diferentes tipos de amenazas existentes.

Del trabajo recopilado a través del aplicativo móvil y en particular del trabajo de campo realizado en el municipio de Jericó, se logró identificar que para la tipología de mampostería, la más comúnmente encontrada, existen tres categorías identificables, mampostería confinada

encontrada en, aproximadamente, un 13% de los CERs visitados en Jericó, mampostería simple encontrada en alrededor del 33% de los CERs visitados y mampostería semiconfinada encontrada en más del 40% de los CERs visitados. Por esto, este trabajo se enfoca en estas dos últimas categorías o tipologías. A su vez, fue posible identificar dos tipos de cubiertas, la primera corresponde a teja de fibro cemento o asbesto cemento apoyada en cerchas o elementos metálicos y la segunda, corresponde a teja de barro con una estructura de soporte en madera. Para el caso de los muros se identificó una longitud promedio de 6,0 m (1,6 m si se toman solo las porciones de muro sin vacíos), una altura promedio 2,6 m y un espesor de 0,15 m. Se identificaron algunos casos en los cuales se utilizan columnas en los extremos de las fachadas y algunas veces, columnas interiores a lo largo de la fachada, sin embargo, la separación de estos elementos estructurales supera en la mayoría de los casos los 4,0 m no permitiendo asumir que la estructura tenga un comportamiento propio de un confinamiento efectivo, al igual que en los casos en los que las fachadas presentan vacíos significativos.

Durante la inspección de los Centros Educativos Rurales se logró identificar los daños más frecuentes y los elementos que se consideran más críticos para la vulnerabilidad sísmica. En primer lugar, se observó que la cubierta es uno de los puntos que muestra mayores problemas debido a que fue frecuente encontrar daños, tanto para los casos de lámina de asbesto cemento como para los de la teja de barro. También fue evidente la vulnerabilidad de las cubiertas en varios casos debido a un sistema de apoyo deficiente y a la ausencia de elementos de conexión entre las cerchas metálicas longitudinales sobre las cuales se apoyan las tejas, lo cual hace que el sistema sea excesivamente flexible. Aproximadamente el 65% de las cubiertas inspeccionadas no cuentan con canoas y bajantes para recolectar el agua lluvia, por lo tanto, generan problemas de humedades y de afectación al terreno circundante del CER, acelerando el fenómeno de los asentamientos. En cuanto al sistema responsable de atender la carga sísmica, se evidenció a nivel constructivo deficiencias en la conexión de muros perpendiculares y ausencia de vigas de amarre en la parte superior de los muros, lo cual genera fisuras en los muros por la concentración

de cargas, limita su capacidad de soportar carga fuera del plano e imposibilita la configuración de un diafragma a nivel de cubierta. Estas soluciones sin vigas de amarre permiten valores mayores de deformación en los muros a costa de capacidades menores para resistir cargas impuestas. La presencia significativa de daños en los diferentes CERs inspeccionados resultó en el reconocimiento de la necesidad de identificar inicialmente si la estructura presenta o no estos daños, ya que esta particularidad repercute directamente en el comportamiento de la estructura ante la ocurrencia de un evento sísmico y su presencia puede implicar que otros aspectos o características propias, del CER o de los muros estudiados, tengan una menor importancia de cara al cálculo de la vulnerabilidad de la estructura estudiada.

La metodología propuesta por Giordano et al., (2020), adaptada en el presente estudio, permitió conocer la importancia de tener en cuenta este tipo de falla presente en las estructuras que forman la mayoría de los CERs de Antioquia y, probablemente, de Colombia, y permitió a su vez, mediante los cálculos realizados, determinar los parámetros clave que pueden generar un escenario crítico. Por lo tanto, permitirá en un futuro, reducir la implementación de estas prácticas para evitar una posible contingencia.

Del análisis paramétrico realizado, se concluye que las variables que más influyen en la resistencia máxima fuera del plano son el espesor del muro y la carga impuesta sobre el mismo. En cuanto a la capacidad de deformación fuera del plano, ésta depende de variables tales como el espesor del muro y su altura. Es por lo tanto, el espesor del muro el que, ante la presencia de una construcción adecuada y una ausencia de daños, toma especial protagonismo de cara a esta tipología de falla, de las más comunes según lo planteado en el Capítulo 4, puesto que el área o sombra del muro depende directamente de este espesor, cuya dimensión es paralela a la aplicación de una eventual fuerza fuera del plano y su variación se evidenciaría principalmente como un aumento o disminución en la cantidad de masa que sería afectada por esta fuerza, en otras palabras, el espesor afecta directamente la inercia que se opone a una fuerza aplicada fuera del plano del muro. Los parámetros que más presentan variación en los centros educativos

rurales de acuerdo con el trabajo de campo realizado son la resistencia de la mampostería y, por lo tanto, su módulo de elasticidad, su límite de compresión y su peso específico, lo cual se da, en parte, por la variedad de ladrillos que se pueden encontrar en el mercado, por la variación de las materias primas y por el cambio que se presenta entre cada proveedor de estos insumos; y la calidad constructiva que puede variar en función de la falta de mano de obra calificada y del año de construcción del CER estudiado. De acuerdo con este análisis, el desplazamiento que puede causar el colapso de las escuelas rurales puede variar entre aproximadamente 3 y 6 cm medidos a media altura del muro, mientras que la carga máxima que pueden soportar las escuelas rurales normalizada por el peso total del muro, es decir, carga sobre peso del muro (valor en unidades de kN/kN), asociada a un estado de daño moderado, puede variar alrededor, de 0,03 y 0,53 kN/kN, tal como se puede inferir de la Tabla 12 y de la Tabla 14.

La metodología implementada para evaluar el comportamiento fuera del plano se aplicó para evaluar los niveles de aceleración pico del suelo, PGA, que producirían cierto nivel de daño en las estructuras. Para ello, se analizaron todas las fachadas de las 8 escuelas seleccionadas y se identificaron 47 muros que ante un análisis de vacíos detallado, planteado por Giordano et al., (2020), pasaron a ser 136 “piers”. Se identificó, de acuerdo con el análisis realizado para los Centros Educativos Rurales del municipio de Jericó, que los muros con alturas superiores a 2,4 m y con espesores menores a 15 cm pueden presentar daños que varían entre leves y moderados. Los muros que tienen espesores menores a 10 cm y alturas superiores a 2,8 m presentan una alta vulnerabilidad y pueden ser catalogados como peligrosos ante la ausencia de otras deficiencias o daños presentes en la estructura estudiada.

Para esta zona de estudio, es poco probable que se presenten daños severos y colapsos de acuerdo con los resultados obtenidos del modelo analítico y de los valores de la sismicidad histórica registrada. Esta probabilidad solo se puede ver aumentada ante la existencia de muros con características que aumenten de forma significativa su vulnerabilidad. Un ejemplo de lo anterior se presenta con los espesores, en donde muros con espesores de 12 cm, muestran un

nivel de daño severo en niveles de PGA > 0,15 g, mientras que el colapso se puede presentar para un PGA > 0,20 g. Para el caso de muros con espesores de 15 cm, los niveles aumentan ligeramente, daño severo para PGA > 0,20 g y colapso para valores mayores a 0,25 g.

La metodología propuesta incorpora dos consideraciones que permiten diferenciarla de las metodologías existentes: en primer lugar, se consideran 3 escenarios diferentes que asignan el peso o importancia a cada una de las variables propuestas según las particularidades de la estructura estudiada, lo anterior, considerando que la existencia o no de un cierto nivel de daño en la cubierta y en los muros, debe ser considerado a la hora de asignar los respectivos pesos de las variables involucradas. La segunda consideración es que se utilizó una metodología analítica para evaluar el comportamiento fuera del plano de la mampostería, lo cual permitió asignar los pesos a las variables con un criterio basado en la mecánica, puesto que estas características del muro o particularidades geométricas y de carga, toman protagonismo cuando la estructura no muestra presencia de daños significativos en muros y/o cubiertas. A partir de estas dos principales consideraciones, fue posible proponer el resto de las variables con base en otras características asociadas a la estructura como su configuración, materiales de composición, uso de varios componentes, entre otros. El final de este trabajo corresponde a una metodología que no solo tiene en cuenta las principales características de la estructura, sino aspectos que pueden predecir el comportamiento de esta ante un evento sísmico. Variables como la ubicación del módulo y el manejo de aguas en la cubierta pueden indicar cómo será el comportamiento de las zonas aledañas al CER y cómo afectarán estas a la estructura y a sus componentes, variables asociadas a la composición y características del muro podrán predecir cómo será el comportamiento de los componentes de la estructura, que en conjunto con otras variables asociadas a la conexión y configuración de estos elementos, permitirán conocer si, en efecto, estos componentes se comportarán o no como un conjunto. Finalmente, variables asociadas al estado de los elementos de la estructura, permitirán determinar si el resto de las variables

propuestas pueden contar o no con un protagonismo que admita evaluar la vulnerabilidad de la edificación estudiada.

La metodología propuesta en el presente estudio se confrontó con la metodología de evaluación de la vulnerabilidad propuesta por Benedetti & Petrini, (1982), en donde además de identificar satisfactoriamente las estructuras con vulnerabilidad alta de un conjunto de CERs de diferentes municipios, se reconocen configuraciones con un mayor nivel de detalle que hacen posible identificar deficiencias o limitaciones que otras metodologías no logran determinar, sin dejar de lado consideraciones que permitan distinguir las capacidades estructurales que poseen los muros, esto último por la identificación de casos de vulnerabilidad baja (ver Tabla 35). Lo anterior, en conjunto con el criterio de expertos, presentes en el trabajo de campo realizado en Jericó, permitió establecer una evaluación cualitativa en cada uno de los 8 CERs seleccionados que posteriormente se comparó con una evaluación planteada con la metodología propuesta en el presente estudio y con lo propuesto por Benedetti & Petrini, (1982), dando lugar a lo que se puede apreciar en la Tabla 36, en donde nuevamente la metodología postulada presenta un comportamiento más conservador que las otras dos evaluaciones de la vulnerabilidad de los CERs estudiados.

Finalmente, se destaca el que la implementación de la metodología propuesta requerirá solo de conocimientos básicos que podrán ser impartidos momentos antes de la evaluación propia, facilitando el acceso de esta a una mayor cantidad de Centros Educativos Rurales u otras edificaciones que pudiesen llegar a aplicar. La evolución en la distribución del formulario y el uso de métodos convencionales de post procesamiento en el aplicativo móvil permitirá tener un mayor alcance en el territorio y las propias herramientas disponibles en el aplicativo facilitarán su implementación. El conocimiento de las tipologías más frecuentes de la región aunado con el conocimiento del tipo de falla más común de éstas permite establecer una base sólida a partir de la cual se puede determinar la vulnerabilidad sísmica de una estructura, que de no encontrarse en buen estado permitirá también la adaptación a estas particularidades. En conclusión, en el

presente estudio se propone una metodología de fácil distribución, mediante un aplicativo móvil, para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de los Centros Educativos Rurales, capaz de adaptarse a las particularidades propias de cada estructura en cuanto a daños presentes, calidad de construcción, de materiales, entre otros y confrontada con evaluaciones cualitativas llevadas a cabo por expertos y evaluaciones propuestas como la de Benedetti & Petrini, (1982) que permitieron establecer la validez, y en algunos casos, la moderación de esta metodología.

9. REFERENCIAS

- Adhikari, R., & Gautam, D. (2019). Component level seismic fragility functions and damage probability matrices for Nepali school buildings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 120, 316–319. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.02.009>
- Alcocer, S. M., Arce, J. C., Murià-Vila, D., Fernández-Sola, L. R., & Guardia, D. A. (2020). Assessment of the seismic safety of school buildings in Mexico: A first look. *Earthquake Spectra*, 36(2_suppl), 130–153. <https://doi.org/10.1177/8755293020926184>
- Alcocer, S., & Murià, D. (2018). Advisory services to support the recovery of school infrastructure in Mexico affected by the September 2017 earthquakes Global Program for Safer Schools The recovery of school infrastructure in Mexico affected by the September 2017 earthquakes. *Inifed*, 1(December), 16.
- Angiolilli, M., Lagomarsino, S., Cattari, S., & Degli Abbatì, S. (2021). Seismic fragility assessment of existing masonry buildings in aggregate. *Engineering Structures*, 247(August), 113218. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113218>
- Applied Technology Council, & The World Bank. (2019). *Safety Prioritization of School Buildings for Seismic Retrofit using Performance-Based Risk Assessment in the Kyrgyz Republic*. www.ATCouncil.org
- ASCE, A. S. of C. E. (2016). ASCE STANDARD ASCE/SEI 7-16 Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. In *ANSI/ASCE Standard* (Issue 7 98).
- Asociación Colombiana de Ingeniería. (2010). Título A: Requisitos generales de diseño y construcción sismo resistente. *Nsr 10*, A-83, A-139, A-140.
- Baena Urrea, J. F. (2019). *Evaluación experimental de la respuesta fuera del plano de muros de mampostería, no reforzada y reforzada con franjas de mallas electrosoldadas y mortero*. 39.
- Benedetti, & Petrini. (1982). *Método del Índice de Vulnerabilidad*. 2, 38–60. https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6222/04CAPITULO_3.pdf?sequence=4&isAllowed=y

- Caparos, R. Y., Fajardo, X. B., Ilagan, H. M. M., Revelo, J. N., & Oreta, A. W. C. (2017). A Database Management System for Rapid Visual Screening and Two-Dimensional Seismic Vulnerability Classification of Public School Buildings. In *6th Civil Engineering Conference in Asia Region: Embracing the Future through Sustainability* (Issue March).
- D'Ayala, D. F., & Paganoni, S. (2011). Assessment and analysis of damage in L'Aquila historic city centre after 6th April 2009. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9(1), 81–104. <https://doi.org/10.1007/s10518-010-9224-4>
- Degli Abbatì, S., & Lagomarsino, S. (2017). Out-of-plane static and dynamic response of masonry panels. *Engineering Structures*, 150, 803–820. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.07.070>
- Didier, M., Baumberger, S., Tobler, R., Esposito, S., Ghosh, S., & Stojadinovic, B. (2017). Improving post-earthquake building safety evaluation using the 2015 Gorkha, Nepal, Earthquake rapid visual damage assessment data. *Earthquake Spectra*, 33(Special issue 1), S415–S434. <https://doi.org/10.1193/112916EQS210M>
- Doherty, K., Griffith, M. C., Lam, N., & Wilson, J. (2002). Displacement-based seismic analysis for out-of-plane bending of unreinforced masonry walls. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31(4), 833–850. <https://doi.org/10.1002/eqe.126>
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2015). Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards: FEMA 154 and FEMA 155 updates. In *NCEE 2014 - 10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering: Frontiers of Earthquake Engineering*. <https://doi.org/10.4231/D3M90238V>
- Ferreira, T. M., Costa, A. A., Vicente, R., & Varum, H. (2015). A simplified four-branch model for the analytical study of the out-of-plane performance of regular stone URM walls. *Engineering Structures*, 83, 140–153. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.10.048>
- Gentile, R., Galasso, C., Idris, Y., Rusydy, I., & Meilianda, E. (2019). From rapid visual survey to multi-hazard risk prioritisation and numerical fragility of school buildings. *Natural Hazards*

- and Earth System Sciences*, 19(7), 1365–1386. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-1365-2019>
- Giordano, N., De Luca, F., & Sextos, A. (2020). Out-of-plane closed-form solution for the seismic assessment of unreinforced masonry schools in Nepal. *Engineering Structures*, 203(August 2019), 109548. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109548>
- Heyman, J. (1966). *THE STONE SKELETON*. 2.
- Jauregui Estupiñan, S. S., León Díaz, R. B., Gallego Montoya, J. J., Sánchez Castro, I., & Rendón Rivera, A. (2022). Guía para la inspección rápida del riesgo en escuelas rurales. *Escuelas Rurales Seguras*, 1–45.
- Lizundia, Bret, Narayan Shrestha, Surya, Bevington, John, Davidson, Rachel, Jaiswal, Kishor, Kumar Jimée, Ganesh, Kaushik, Hemant, Kumar, Hari, Kupec, Jan, Mitrani-Reiser, Judy, Poland, Chris, Shrestha, Suraj, Welton-Mitchell, Courtney, Tremayne, Heidi, O, M. (2021). M7.8 Gorkha, Nepal Earthquake on April 25, 2015 and its Aftershocks. In *Encyclopedia of Nuclear Energy* (Issue May). <https://doi.org/10.4324/9781315558974-11>
- Mazza, F., & Donnici, A. (2018). Nonlinear modelling of the in-plane-out-of-plane interaction in the seismic analysis of masonry infills in r.c. framed buildings. *Procedia Structural Integrity*, 11, 218–225. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.11.029>
- Meneses-Loja, J., & Aguilar, Z. (2004). 13 th World Conference on Earthquake Engineering SEISMIC VULNERABILITY OF SCHOOL BUILDINGS IN LIMA , PERU. *13th World Conference on Earthquake Engineering*, 1683.
- Mohamad, I. I., Mohd Yunus, M. Z., & Harith, N. S. H. (2019). Assessment of building vulnerability by integrating rapid visual screening and geographic information system: A case study of Ranau township. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 527(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/527/1/012042>
- Ningthoujam, M. C., & Nanda, R. P. (2018). Rapid visual screening procedure of existing building based on statistical analysis. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 28, 720–730. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2018.01.033>

- Pujianto, A., Prayuda, H., Rosyidi, S. A. P., Monika, F., & Faizah, R. (2019). Rapid Visual Screening (RVS) for School Buildings after Earthquake in Lombok, West Nusa Tenggara, Indonesia. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 650(1).
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/650/1/012038>
- Report, B. C. P.-D. R. (2015). *April 25, 2015 – GORKHA EARTHQUAKE, NEPAL*.
- Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process-what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3–5), 161–176. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)
- Secretaría de Economía. (2015). *Norma mexicana NMX-R079-SCFI-2015. Escuelas - seguridad estructural de la infraestructura física educativa - requisitos*. 241.
- Sharma, S., Tomassetti, U., Graziotti, F., & Magenes, G. (2021). Simplified methodologies for assessing the out-of-plane two-way bending seismic response of unreinforced brick masonry walls: lessons from recent experimental studies. *Structures*, 33(March), 2839–2854.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.03.121>
- Sísmica, L. D. I., Investigaciones, I. De, Rica, U. D. C., Pedro, S., Oca, M. De, Rica, C., & Az, T. (2008). *RELATIONSHIP BETWEEN PEAK GROUND ACCELERATION AND MODIFIED MERCALLI INTENSITY IN COSTA RICA* Lepolt Linkimer Present address : Department of Geosciences , The University of Arizona ,. 81–94.
- Sorrentino, L., D’Ayala, D., de Felice, G., Griffith, M. C., Lagomarsino, S., & Magenes, G. (2017). Review of Out-of-Plane Seismic Assessment Techniques Applied To Existing Masonry Buildings. *International Journal of Architectural Heritage*, 11(1), 2–21.
<https://doi.org/10.1080/15583058.2016.1237586>
- Toskano Hurtado, G. B. (2005). El proceso de Análisis Jerárquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores. *Universidad Nacional Mayor de San Marcos*, 141.
https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/4082%0Ahttp://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/cybertesis/4147/Diaz_rc.pdf;jsessionid=CD5A7FF3022F1A552694

8369A600356D?sequence=1

Vaculik, J. (2012). *Unreinforced masonry walls subjected to out-of-plane seismic actions*. 329.

American Cancer Society. (16 de 11 de 2015). *Cancer.org*. Obtenido de <https://www.cancer.org/es/cancer/causas-del-cancer/asbesto.html>

BBC News. (26 de 04 de 2015). *BBC*. Obtenido de https://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/04/150426_nepal_vulnerabilidad_terremotos en

Desinventar. (2020). Obtenido de <https://online.desinventar.org/>

Desinventar. (2020). Obtenido de <https://www.desinventar.org/>

El Espectador. (2017). Obtenido de <https://www.elespectador.com/noticias/educacion/1024-sedes-escolares-en-antioquia-con-danos-en-su-infraestructura/>

El País. (17 de 10 de 1992). Obtenido de https://elpais.com/diario/1992/10/18/internacional/719362801_850215.html

Servicio Geológico Colombiano. (2016). *Historia sísmica del departamento de Antioquia*. Obtenido de http://sish.sgc.gov.co/visor/sesionServlet?metodo=irATablaCompleta&opciones=INTENSIDADES_DEPTO5

Servicio Geológico Colombiano. (2023). Obtenido de <https://www2.sgc.gov.co/ProgramasDeInvestigacion/geoamenazas/amenaza-sismica/Paginas/GrandesSismosColombia.aspx>

10. ANEXO 1 – PANTALLAS DE FORMULARIO MAGNÉTICO DE APLICATIVO MÓVIL



1 Sección 1

Fecha: 2022-01-23

Nombre del encuestado

Rol del encuestador:
 Seleccione una opción

Teléfono

Correo

Nombre de la Institución

Coordenadas

Latitud Longitud

[Ver Mapa](#)

Municipio:
 Seleccione un municipio

Corregimiento o Vereda

Dirección

Número de estudiantes

Número de profesores y/o funcionarios

Número de aulas

Jornadas: Seleccione una opción

Estrato: Seleccione una opción

Nivel de enseñanza de la institución:
 Seleccione una opción

Dominio de la institución:
 Seleccione una opción

← Crear formulario

Fotografías

Fachada principal

Fachada lateral derecha

Fachada lateral izquierda

Fachada posterior

CONTINUE **CANCEL**

2 Sección 2

3 Sección 3

Guardar como borrador **Guardar formulario**

1 Sección 1

2 Sección 2

Número de Módulos

Módulo 1

Número de pisos: Seleccione

Año de construcción:
 Seleccione una opción

Medidas

Altura de fachada (m)

Longitud del frente (m)

Longitud del fondo (m)

Sistema estructural

Columnas y vigas

Muros de tapia

Muros de ladrillo

Mampostería de ladrillo y vigas de concreto

Muros de ladrillo, columnas y vigas de concreto

Muros bloque de concreto

Mixto

Otro

Esquema

1. Elabore un esquema a mano alzada de la planta de la escuela.
 2. Ubique las columnas.
 3. Marque la separación entre ellas.
 4. Tome una foto e insértela aquí.

Tipo de cimentación:

¿Se puede apreciar el sistema de cimentación?

Sí

No

¿Cómo es el techo? Elija la opción que más se le parezca.

Plano

Abuhardillado

Cobertizo

Mariposa

Cuatro vertientes

De dos aguas

← Crear formulario

Linterna

A la holandesa

Arqueado

Tipo de tejado: ?

- Losa de concreto
- Vigas y tabillitas de madera + Teja de barro
- Vigas y tabilla de madera + Tejas de cemento (Eternit)
- Vigas o cerchas de acero + Tejas de cemento (Eternit)
- Láminas de zinc
- Otro


Infraestructura

Cuál es el estado general de la ...

	Fisuras y grietas	Colapso	Ninguno
Muros de fachada	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Muros interiores	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Columnas	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Vigas	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Techo	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Pisos	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Escaleras	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Balcones	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>


Otros aspectos relevantes y/o ...

Foto del módulo



Nota: Recordar tomar fotografías del deterioro (hasta 10).

Imágenes



CONTINUE CANCEL

Sección 3

Guardar como borrador Guardar formulario

Sección 1

Sección 2

Sección 3

Problemas geológicos en el entorno ?

Evidencia de problemas geológicos alrededor del centro educativo

- ¿Existen grietas o huecos en el terreno?
- ¿Existen derrumbes?
- ¿Existen afloramientos de agua o nacimientos?
- Ríos, quebradas o drenajes en inmediaciones de la escuela
- Existen bloques de roca expuestos en superficie (> 50cm de diámetro)?
- ¿Existen árboles de gran tamaño que representen amenaza?


El relieve del CER ?

¿Cómo es el relieve en las inmediaciones de la escuela?

- Plano
- Intermedio
- Muy inclinado

Observaciones

Inserte foto panorámica de la escuela.




El relieve del CER ?

¿Cómo es el relieve en las inmediaciones de la escuela?

- Plano
- Intermedio
- Muy inclinado

Observaciones

Inserte foto panorámica de la escuela.



← Crear formulario

Disposición final de aguas residuales ?

Seleccione el método de disposición final de las aguas residuales del CER

- Pozo séptico
- Quebrada o drenaje
- Campo abierto
- No se conoce
- Otro

¿Hace cuánto tiempo se le hizo mantenimiento al pozo séptico o dispositivo de conducción para la disposición final de aguas residuales en drenaje o campo abierto?

- 1 - 5 años
- 5 - 10 años
- Mayor a 10 años

Comentarios

Inserte foto del sistema final de disposición de aguas residuales.



Transporte de agua para consumo ?

Tipo de transporte de agua para el consumo del personal de la escuela

- Acequia (Zanja en tierra)
- Manguera
- Tubería
- No se conoce

¿Hace cuánto se le hizo mantenimiento?


- 1 - 5 años
- 5 - 10 años
- Mayor a 10 años

¿En qué estado se encuentra?

- Bueno
- Regular
- Malo

Comentarios

Si es posible, inserte foto del tipo de transporte de agua para el consumo personal de la escuela



Manejo de aguas en techos y cubiertas ?


¿Existen canoas y bajantes para la recolección de agua lluvia de los techos?

- Si, en su totalidad
- Si, parcialmente
- No, no existe

¿En qué estado se encuentra?

- Bueno
- Regular
- Malo

Si es posible, inserte foto de las canoas y bajantes para la recolección de agua lluvia de los techos



Comentarios

Historial de Desastres ?

¿Han ocurrido derrumbes que hayan afectado al centro educativo?

¿Han ocurrido Inundaciones?


¿Han ocurrido borrascas o avalanchas?

¿Han ocurrido asentamientos o hundimientos en el suelo dentro de la escuela?

¿Han ocurrido Sismos/ Terremotos que hayan afectado el CER?

¿Ha ocurrido otro tipo de fenómeno desastroso?

Si es posible, inserte foto sobre un evento desastroso histórico.



Vulnerabilidad institucional ?

¿Existe Plan escolar de Gestión del Riesgo?


¿Existe comité escolar de gestión del riesgo activo?

¿Reciben capacitación periódica relacionada con la Gestión Escolar del Riesgo?

¿Existe señalización relacionada con la prevención de desastres y la atención de emergencias?

¿Realizan simulacros de evacuación periódicamente como mínimo una vez al año?

Si es posible, inserte una foto sobre señalización, botiquín de primeros auxilios o simulacros anteriores.



CONTINUE **CANCEL**

Guardar como borrador **Guardar formulario**

- *Enlace de aplicación en la Google Play Store: https://play.google.com/store/apps/details?id=com.escuelas_seguras*
- *Este aplicativo cuenta con una guía publicada por Jauregui Estupiñan et al., (2022) que puede ser obtenida de forma gratuita mediante una solicitud escrita al correo electrónico EscuelasRuralesAnt@hotmail.com.*

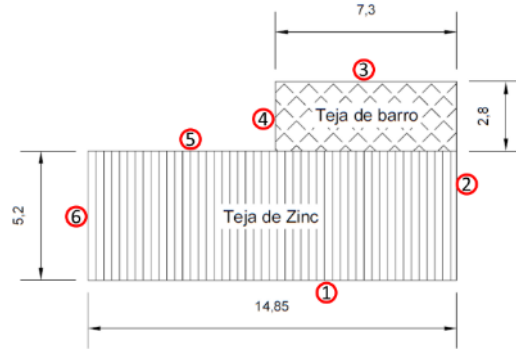
11. ANEXO 2 – CARACTERIZACIÓN DE MUROS SIN VACÍOS “PIERS”

CENTRO EDUCATIVO RURAL

ESQUEMA [m]

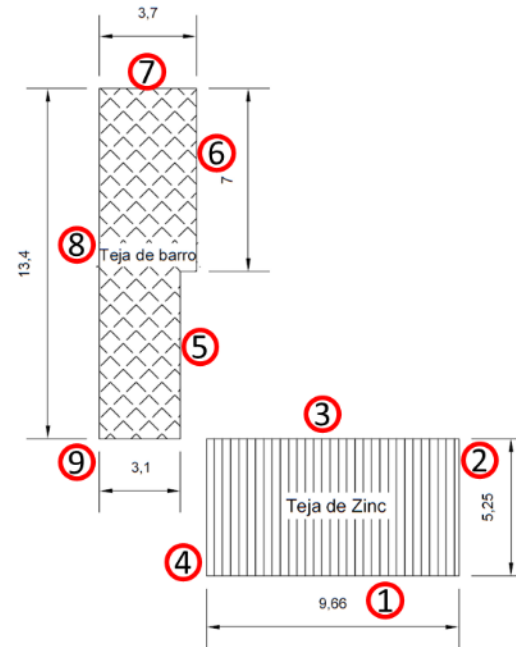
LISTADO DE PIERS

CER Monseñor Augusto Trujillo Arango



MURO BASE	MURO	ID	CONDICIÓN	LONGITUD [m]	ALTURA MURO [m]	ESPESOR [m]	CARGA [kN]
1	1	1-1	Pinned - Pinned	1,4	2,9	0,12	0,61
1	2	1-2	Pinned - Pinned	0,4	2,9	0,12	0,18
1	3	1-3	Pinned - Pinned	0,6	2,9	0,12	0,26
1	4	1-4	Pinned - Pinned	0,5	2,9	0,12	0,22
1	5	1-5	Pinned - Pinned	0,8	2,9	0,12	0,35
2	1	2-1	Pinned - Pinned	5,25	2,9	0,12	4,31
2	2	2-2	Pinned - Pinned	2,8	2,9	0,12	2,3
3	1	3-1	Pinned - Pinned	7,3	2,9	0,12	6,61
4	1	4-1	Pinned - Pinned	2,8	2,9	0,12	1,57
5	1	5-1	Pinned - Pinned	1,8	2,9	0,12	0,5
5	2	5-2	Pinned - Pinned	1,4	2,9	0,12	0,39
6	1	6-1	Pinned - Pinned	1,7	2,9	0,12	0,45
6	2	6-2	Pinned - Pinned	1,3	2,9	0,12	0,34

CER Álvaro Ardulio Naranjo



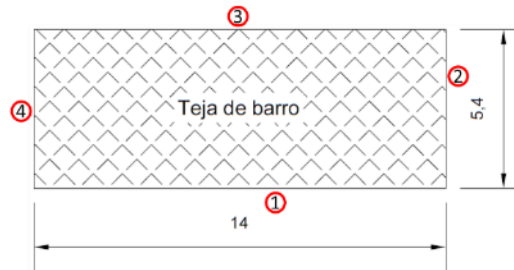
MURO BASE	MURO	ID	CONDICIÓN	LONGITUD [m]	ALTURA MURO [m]	ESPESOR [m]	CARGA [kN]
1	1	1-1	Pinned - Pinned	0,4	2,9	0,15	0,16
1	2	1-2	Pinned - Pinned	0,5	2,9	0,15	0,2
1	3	1-3	Pinned - Pinned	0,7	2,9	0,15	0,27
1	4	1-4	Pinned - Pinned	0,9	2,9	0,15	0,35
2	1	2-1	Pinned - Pinned	5,25	2,9	0,15	1,38
3	1	3-1	Pinned - Pinned	0,5	2,9	0,15	0,2
3	2	3-2	Pinned - Pinned	1	2,9	0,15	0,39
4	2	4-2	Pinned - Pinned	5,25	2,9	0,15	1,38
5	1	5-1	Cantilever	4,6	3,4	0,15	5,02
5	2	5-2	Cantilever	0,9	3,4	0,15	0,99
6	1	6-1	Cantilever	1,5	3,4	0,15	1,93
6	2	6-2	Cantilever	2,2	3,4	0,15	2,83
6	3	6-3	Cantilever	1,5	3,4	0,15	1,93
7	1	7-1	Cantilever	1,2	3,4	0,15	0,89
7	2	7-2	Cantilever	1,6	3,4	0,15	1,19
8	1	8-1	Cantilever	6,1	3,4	0,15	7,27
8	2	8-2	Cantilever	6,4	3,4	0,15	7,63
9	1	9-1	Cantilever	3,1	3,4	0,15	1,93

CENTRO EDUCATIVO RURAL

ESQUEMA [m]

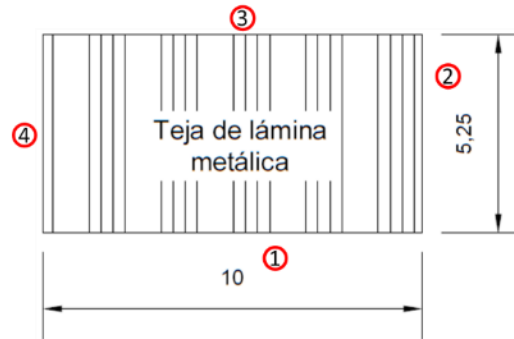
LISTADO DE PIERS

CER Estrella Vieja



MURO BASE	MURO	ID	CONDICIÓN	LONGITUD [m]	ALTURA MURO [m]	ESPESOR [m]	CARGA [kN]
1	1	1-1	Pinned - Pinned	1,5	2,6	0,15	2,62
1	2	1-2	Pinned - Pinned	0,4	2,6	0,15	0,7
1	3	1-3	Pinned - Pinned	8,1	2,6	0,15	14,13
2	1	2-1	Pinned - Pinned	5,4	2,6	0,15	5,84
3	1	3-1	Pinned - Pinned	1,1	2,6	0,15	1,92
3	2	3-2	Pinned - Pinned	1,5	2,6	0,15	2,62
3	3	3-3	Pinned - Pinned	1,5	2,6	0,15	2,62
3	4	3-4	Pinned - Pinned	0,5	2,6	0,15	0,88
3	5	3-5	Pinned - Pinned	0,4	2,6	0,15	0,7
4	1	4-1	Pinned - Pinned	5,4	2,6	0,15	5,84

CER Avelino Marín



MURO BASE	MURO	ID	CONDICIÓN	LONGITUD [m]	ALTURA MURO [m]	ESPESOR [m]	CARGA [kN]
1	1	1-1	Pinned - Pinned	0,7	2,16	0,15	0,11
1	2	1-2	Pinned - Pinned	0,4	2,16	0,15	0,07
1	3	1-3	Pinned - Pinned	0,4	2,16	0,15	0,07
1	4	1-4	Pinned - Pinned	1,3	2,16	0,15	0,21
2	1	2-1	Pinned - Pinned	5,25	2,16	0,15	0,56
3	1	3-1	Pinned - Pinned	4,2	2,16	0,15	0,66
3	2	3-2	Pinned - Pinned	0,4	2,16	0,15	0,07
3	3	3-3	Pinned - Pinned	0,6	2,16	0,15	0,1
4	1	4-1	Pinned - Pinned	5,25	2,16	0,15	0,56

CER Escuela La Cascada Normal



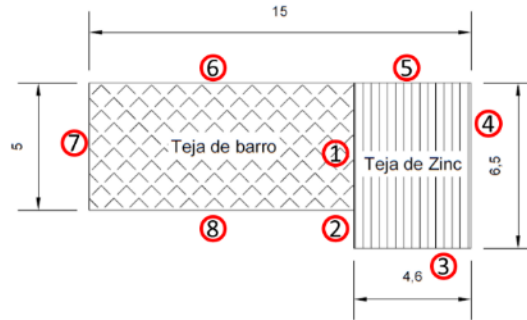
MURO BASE	MURO	ID	CONDICIÓN	LONGITUD [m]	ALTURA MURO [m]	ESPESOR [m]	CARGA [kN]
1	1	1-1	Pinned - Pinned	1,6	2,4	0,15	3,04
1	2	1-2	Pinned - Pinned	2	2,4	0,15	3,8
1	3	1-3	Pinned - Pinned	1,4	2,4	0,15	2,66
1	4	1-4	Pinned - Pinned	1	2,4	0,15	1,9
2	1	2-1	Pinned - Pinned	5,25	2,4	0,15	5,52
3	1	3-1	Pinned - Pinned	0,6	2,4	0,15	1,14
3	2	3-2	Pinned - Pinned	0,4	2,4	0,15	0,76
3	3	3-3	Pinned - Pinned	0,4	2,4	0,15	0,76
3	4	3-4	Pinned - Pinned	0,6	2,4	0,15	1,14
4	1	4-1	Pinned - Pinned	5,25	2,4	0,15	5,52

CENTRO EDUCATIVO RURAL

ESQUEMA [m]

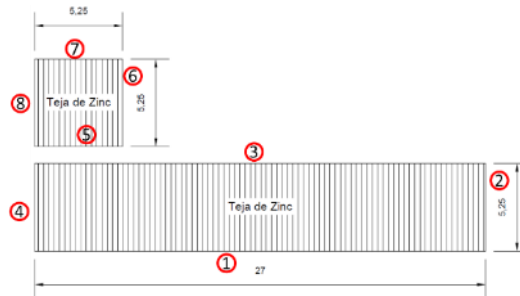
LISTADO DE PIERS

CER La Pradera



MURO BASE	MURO	ID	CONDICIÓN	LONGITUD [m]	ALTURA MURO [m]	ESPESOR [m]	CARGA [kN]
1	1	1-1	Pinned - Pinned	0,8	2,4	0,15	1,04
1	2	1-2	Pinned - Pinned	0,9	2,4	0,15	1,17
1	3	1-3	Pinned - Pinned	0,6	2,4	0,15	0,78
1	4	1-4	Pinned - Pinned	0,6	2,4	0,15	0,78
2	1	2-1	Pinned - Pinned	0,6	2,4	0,15	0,18
3	1	3-1	Pinned - Pinned	0,6	2,4	0,15	0,14
3	2	3-2	Pinned - Pinned	0,8	2,4	0,15	0,19
3	3	3-3	Pinned - Pinned	1,2	2,4	0,15	0,28
3	4	3-4	Pinned - Pinned	1	2,4	0,15	0,23
4	1	4-1	Pinned - Pinned	6,5	2,4	0,15	1,94
5	1	5-1	Pinned - Pinned	4,2	2,4	0,15	0,97
6	1	6-1	Pinned - Pinned	5,6	2,4	0,15	6,54
7	1	7-1	Pinned - Pinned	1,8	2,4	0,15	1,8
7	2	7-2	Pinned - Pinned	1,8	2,4	0,15	1,8

CER Escuela Nueva La Leona



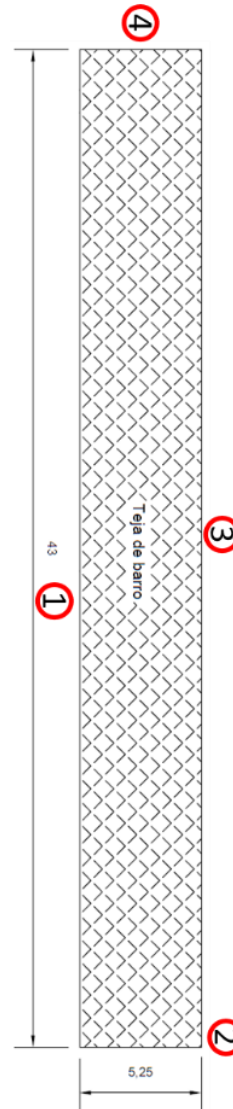
MURO BASE	MURO	ID	CONDICIÓN	LONGITUD [m]	ALTURA MURO [m]	ESPESOR [m]	CARGA [kN]
1	1	1-1	Pinned - Pinned	2,8	2,4	0,15	1,33
1	2	1-2	Pinned - Pinned	0,3	2,4	0,15	0,15
1	3	1-3	Pinned - Pinned	0,8	2,4	0,15	0,38
1	4	1-4	Pinned - Pinned	1,6	2,4	0,15	0,76
1	5	1-5	Pinned - Pinned	0,3	2,4	0,15	0,15
1	6	1-6	Pinned - Pinned	0,8	2,4	0,15	0,38
1	7	1-7	Pinned - Pinned	1,6	2,4	0,15	0,76
1	8	1-8	Pinned - Pinned	0,3	2,4	0,15	0,15
1	9	1-9	Pinned - Pinned	0,3	2,4	0,15	0,15
1	10	1-10	Pinned - Pinned	1,2	2,4	0,15	0,57
2	1	2-1	Pinned - Pinned	5,25	2,4	0,15	1,38
3	1	3-1	Pinned - Pinned	1,2	2,4	0,15	0,57
3	2	3-2	Pinned - Pinned	0,4	2,4	0,15	0,19
3	3	3-3	Pinned - Pinned	0,6	2,4	0,15	0,29
3	4	3-4	Pinned - Pinned	0,6	2,4	0,15	0,29
3	5	3-5	Pinned - Pinned	0,4	2,4	0,15	0,19
3	6	3-6	Pinned - Pinned	0,6	2,4	0,15	0,29
3	7	3-7	Pinned - Pinned	1,8	2,4	0,15	0,86
4	1	4-1	Pinned - Pinned	1,2	2,4	0,15	0,32
4	2	4-2	Pinned - Pinned	1,2	2,4	0,15	0,32
5	1	5-1	Pinned - Pinned	4,56	2,4	0,15	1,2
6	1	6-1	Pinned - Pinned	0,6	2,4	0,15	0,16
6	2	6-2	Pinned - Pinned	0,6	2,4	0,15	0,16
7	1	7-1	Pinned - Pinned	4,56	2,4	0,15	1,2
8	1	8-1	Pinned - Pinned	1,8	2,4	0,15	0,48
8	2	8-2	Pinned - Pinned	0,4	2,4	0,15	0,11

FACHADA CENTRO EDUCATIVO RURAL

ESQUEMA [m]

LISTADO DE PIERS

CER Santiago Santamaría



MURO BASE	MURO	ID	CONDICIÓN	LONGITUD [m]	ALTURA MURO [m]	ESPESOR [m]	CARGA [kN]
1	1	1-1	Pinned - Pinned	0,8	2,4	0,15	1,58
1	2	1-2	Pinned - Pinned	0,3	2,4	0,15	0,6
1	3	1-3	Pinned - Pinned	0,3	2,4	0,15	0,6
1	4	1-4	Pinned - Pinned	0,8	2,4	0,15	1,58
1	5	1-5	Pinned - Pinned	0,3	2,4	0,15	0,6
1	6	1-6	Pinned - Pinned	0,3	2,4	0,15	0,6
1	7	1-7	Pinned - Pinned	0,8	2,4	0,15	1,58
1	8	1-8	Pinned - Pinned	0,3	2,4	0,15	0,6
1	9	1-9	Pinned - Pinned	0,3	2,4	0,15	0,6
1	10	1-10	Pinned - Pinned	0,8	2,4	0,15	1,58
1	11	1-11	Pinned - Pinned	0,3	2,4	0,15	0,6
1	12	1-12	Pinned - Pinned	0,3	2,4	0,15	0,6
1	13	1-13	Pinned - Pinned	0,8	2,4	0,15	1,58
1	14	1-14	Pinned - Pinned	0,3	2,4	0,15	0,6
1	15	1-15	Pinned - Pinned	0,3	2,4	0,15	0,6
1	16	1-16	Pinned - Pinned	2	2,4	0,15	3,95
1	17	1-17	Pinned - Pinned	1	2,4	0,15	1,98
1	18	1-18	Pinned - Pinned	0,4	2,4	0,15	0,79
1	19	1-19	Pinned - Pinned	0,4	2,4	0,15	0,79
2	1	2-1	Pinned - Pinned	5,25	2,4	0,15	5,52
3	1	3-1	Pinned - Pinned	0,8	2,4	0,15	1,58
3	2	3-2	Pinned - Pinned	0,6	2,4	0,15	1,19
3	3	3-3	Pinned - Pinned	0,8	2,4	0,15	1,58
3	4	3-4	Pinned - Pinned	0,8	2,4	0,15	1,58
3	5	3-5	Pinned - Pinned	0,6	2,4	0,15	1,19
3	6	3-6	Pinned - Pinned	0,8	2,4	0,15	1,58
3	7	3-7	Pinned - Pinned	0,8	2,4	0,15	1,58
3	8	3-8	Pinned - Pinned	0,6	2,4	0,15	1,19
3	9	3-9	Pinned - Pinned	0,8	2,4	0,15	1,58
3	10	3-10	Pinned - Pinned	0,8	2,4	0,15	1,58
3	11	3-11	Pinned - Pinned	0,6	2,4	0,15	1,19
3	12	3-12	Pinned - Pinned	0,8	2,4	0,15	1,58
3	13	3-13	Pinned - Pinned	0,8	2,4	0,15	1,58
3	14	3-14	Pinned - Pinned	0,6	2,4	0,15	1,19
3	15	3-15	Pinned - Pinned	0,8	2,4	0,15	1,58
4	1	4-1	Pinned - Pinned	5,25	2,4	0,15	5,52