

EVALUATION AND REHABILITATION OF INFORMAL HOUSING IN QUITO

Paúl Guerrero D.⁽¹⁾, María de las Nieves Suarez⁽²⁾

⁽¹⁾ Doctorado en Proyectos, Universidad Internacional Iberoamericana (UNINI), México, paul.guerrero@doctorado.unini.edu.mx

⁽²⁾ Doctorado en Proyectos, Universidad Internacional Iberoamericana (UNINI), México, maria.suarez@unini.edu.mx

Received: March 2025. Accepted: June 2025. Published: October 2025

ABSTRACT

This research presents a technical proposal to contribute to the seismic evaluation and rehabilitation of informal housing in Quito, Ecuador, focusing on low-rise buildings (up to three stories) constructed without technical or regulatory oversight, which account for more than 60% of the urban housing stock. A systemic approach was applied to analyze 2469 structures through visual inspections and linear and non-linear mathematical models, identifying seven representative prototypes. The proposed intervention consists of using reinforced concrete overlays with welded wire mesh on masonry walls, designed based on stiffness and strength properties to meet performance objectives established by ASCE 41 (2017), FEMA-356 (2000), Hazus (2022), and NEC (2015). Results show that this technique significantly reduces drifts and vibration periods, enhancing structural performance from near-collapse to slight damage levels without altering the predominant modal behavior. This approach is a replicable and effective solution for high-seismic-risk urban contexts dominated by informal construction.

Keywords: Informal housing, vulnerable constructions, structural evaluation, seismic performance, seismic rehabilitation.

EVALUACIÓN Y REHABILITACIÓN DE VIVIENDAS INFORMALES EN QUITO

RESUMEN

Este artículo presenta una propuesta técnica para contribuir con la evaluación y rehabilitación sísmica de viviendas informales en la ciudad de Quito, Ecuador, específicamente aquellas de hasta tres pisos construidas sin control técnico ni normativo, las cuales representan más del 60 % del parque habitacional urbano. A través de un enfoque sistémico, se analizaron 2469 edificaciones mediante inspecciones visuales y con modelos matemáticos lineales y no lineales para determinar su desempeño estructural, identificando siete prototipos representativos. La intervención propuesta en las viviendas consiste en la colocación de enchapes de concreto reforzado con malla electrosoldada sobre las paredes de mampostería, dimensionados según propiedades de rigidez y resistencia para cumplir con los criterios de desempeño definidos por la normativa ASCE 41 (2017), FEMA-356 (2000), Hazus (2022) y la NEC (2015). Los resultados muestran que esta técnica reduce significativamente las derivas y el periodo de vibración, mejorando el desempeño estructural desde condiciones cercanas al colapso hasta niveles de daño leve, sin alterar el comportamiento modal predominante. Esta estrategia representa una solución viable y replicable para contextos urbanos de alta vulnerabilidad sísmica con predominancia de construcción informal.

Palabras clave: Vivienda informal, construcciones vulnerables, evaluación estructural, desempeño sísmico, rehabilitación sísmica.

1. INTRODUCCIÓN

La vulnerabilidad sísmica de la vivienda informal constituye uno de los principales desafíos urbanos en América Latina. Estas construcciones, no reguladas y en su mayoría edificadas sin asistencia técnica, representan un riesgo significativo ante eventos sísmicos, tal como lo han evidenciado los terremotos de Haití (2010), México (2017) y Perú (2007), donde gran parte de las pérdidas humanas y económicas se concentraron en edificaciones con deficiencias (Brzev et al., 2003; Buendía Sánchez & Reinoso Angulo, 2019; Villar-Vega et al., 2017).

El Banco Mundial (2021) y la ONU-Hábitat (2023) coinciden en que los programas de rehabilitación sísmica de vivienda informal son esenciales para reducir el riesgo urbano en contextos de alta amenaza. Investigaciones en Ecuador, Perú, Colombia y México han demostrado que técnicas de reforzamiento mediante enchapes de concreto con malla electrosoldada, alambre o fibras de acero han logrado aumentar la rigidez lateral y reducir las derivas de las viviendas rehabilitadas, mejorando significativamente la seguridad estructural de viviendas con baja ductilidad (Castillo Robles et al., 2022; Placencia & Paredes, 2017; Habib et al., 2020; Rubiños et al., 2023; Ruíz & Alcocer, 1998).

El término rehabilitación se interpreta como la suma de todas las acciones destinadas a restituir las prestaciones de un edificio, además de aquellas necesarias para su reacondicionamiento o reforzamiento. Reforzar implica dotar de nuevas prestaciones a una estructura, sin que necesariamente haya experimentado daño previo (Guerrero, Mota-Páez & Escolano, 2024).

La ciudad de Quito es la más poblada de Ecuador con más de 2'679.722 habitantes y 865.770 viviendas (INEC, 2024); está ubicada en una zona de alta peligrosidad sísmica (MIDUVI, 2015a). Al menos el 60 % de las viviendas han sido construidas de manera informal (INEC, 2019), lo que equivale a 519.462 edificaciones vulnerables, susceptibles de sufrir daños severos durante un evento sísmico, poniendo en riesgo la vida de sus habitantes y provocando pérdidas económicas significativas.

El 95 % de los edificios de vivienda construidos en la provincia de Pichincha tienen tres pisos o menos (INEC, 2017); en Quito se estima que más del 80 % cumple con esta condición. Las viviendas informales de uno a tres pisos se construyen típicamente con hormigón armado, con losas bidireccionales, y su sistema estructural principal está resuelto con pórticos resistentes a momento (con vigas descolgadas o losas planas), con mampostería no reforzada de relleno (Guerrero & Suárez-Sánchez, 2025). Aunque existe variabilidad geométrica, muchas de estas viviendas pueden agruparse en tipologías estructurales (Celi, Pantoja, Sosa & Ayala, 2023), con distribución ortogonal, luces entre 3 y 6 metros y alturas de piso de 2.4 a 3.0 metros (Guerrero & Suárez-Sánchez, 2025).

En este estudio se propone una metodología de evaluación y rehabilitación sísmica para las viviendas informales en Quito mediante inspecciones visuales, clasificación prototípica y modelación estructural lineal y no lineal. El objetivo es evaluar el desempeño de los prototipos y dimensionar, validar y aplicar soluciones de refuerzo tipo enchape para mejorar el comportamiento sísmico con base en la normativa: ASCE 41 (2017), FEMA-356 (2000), Hazus (2022) y la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-SE-RE (MIDUVI, 2015). Se espera que los resultados permitan reducir el riesgo estructural y establecer un modelo replicable en otras ciudades de características similares.

2. MATERIALES Y MÉTODO

En esta investigación se estudian cualitativamente 2469 viviendas construidas de manera informal en el sur de Quito, en el sector de Solanda. El objetivo es aplicar una metodología de evaluación y rehabilitación sísmica orientada a mitigar el riesgo estructural y promover soluciones que permitan transformar estas edificaciones en Viviendas CAS (de Calidad, Adecuadas y Seguras),

en cumplimiento de los criterios establecidos por la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-SE-RE (MIDUVI, 2015b) y conforme al marco propuesto por Guerrero y Suárez-Sánchez (2025).

La evaluación inicial (Nivel 1) se llevó a cabo mediante inspecciones visuales, con el fin de caracterizar el sistema estructural resistente, identificar la configuración en planta y en elevación, y estimar la vulnerabilidad sísmica. Esta fase se desarrolló con base en la metodología de FEMA P-154 (2015) y el Manual Técnico del MIDUVI (2022). A partir de esta evaluación, se seleccionaron prototipos representativos mediante un enfoque sistémico que fueron sometidos a una evaluación detallada (Nivel 2). Esta etapa, equivalente a una evaluación de Nivel 3 según ASCE 41-17 (2017), implicó modelación matemática y análisis estructural detallado. Se aplicaron procedimientos complementarios propuestos por FEMA-356 (2000), HAZUS (FEMA, 2022), Ghobarah (2004) y la NEC-SE-RE (MIDUVI, 2015b).

La evaluación estructural incluyó modelación lineal y no lineal, con análisis pushover para estimar el desempeño sísmico de los prototipos. A partir de los resultados, se desarrollaron curvas de fragilidad para estimar el porcentaje de viviendas susceptibles a daño moderado, severo o colapso bajo distintos niveles de demanda sísmica. Estas curvas fueron generadas mediante una adaptación del modelo propuesto por HAZUS (FEMA, 2022). En el análisis estructural se consideraron cargas permanentes de 1000 kg/m² y cargas de uso de 200 kg/m² para losas de cubierta y entrepisos.

El sistema de reforzamiento consiste en enchapes de concreto de 3 cm de espesor, colocados como enlucido manual sobre muros de mampostería no reforzada, utilizando malla electrosoldada de 4 mm de diámetro a 100 mm de separación y mortero con resistencia a compresión $f'_c=140$ kg/cm². El diseño se basa en sus propiedades mecánicas de rigidez y resistencia, aplicando el método de las fuerzas para asegurar que la estructura rehabilitada soporte el nivel de amenaza sísmica BSE-1E sin exceder las derivas máximas permitidas por la NEC-SE-DS, establecidas en $\Delta M = 0.01$ para mampostería (MIDUVI, 2015a).

El nivel BSE-1E (Basic Safety Earthquake - 1E) representa un sismo de amenaza moderada, con un período de retorno aproximado de 225 años. En la normativa ecuatoriana, este nivel se utiliza para verificar el cumplimiento del desempeño de seguridad de vida, es decir, asegurar que la estructura no colapse y permita la evacuación segura de los ocupantes (MIDUVI, 2015b).

Las viviendas informales estudiadas presentan tipologías predominantes de uno a tres pisos, con estructuras aporticadas de hormigón armado, losas alivianadas planas de 20 cm de espesor y muros de mampostería no reforzada. Las columnas tienen secciones típicas de 20 × 30 cm (armadas con 4 barras de Ø16 mm) y 30 × 30 cm (con 8 barras de Ø12 mm). Las vigas o franjas de borde tienen anchos entre 30 y 40 cm, con armadura longitudinal de 3 barras Ø16 mm o Ø14 mm. Los estribos son de Ø8 mm, colocados cada 10 cm en los extremos y cada 20 cm en el centro del vano. Las propiedades mecánicas consideradas para el modelado son: hormigón estructural con $f'_c=210$ kg/cm², acero de refuerzo con $f_y=4200$ kg/cm², mampostería de bloque con $f'_m=40$ kg/cm², módulo de elasticidad $E_m=36000$ kg/cm² y módulo de corte $G=14400$ kg/cm².

En cuanto a las condiciones de emplazamiento, y con base en estudios geotécnicos previos y la zonificación sísmica de la NEC-SE-DS (MIDUVI, 2015a), se identificaron dos tipos predominantes de suelo en el área de estudio: Tipo D (suelos rígidos) y Tipo E (suelos blandos). Ambos fueron modelados con espectros de diseño diferenciados y factores de amplificación sísmica específicos (Aguiar, Rivas-Medina, Caiza & Quizanga, 2017).

- Suelo Tipo D: velocidad de onda de corte entre 180 y 360 m/s, resistencia al corte no drenado entre 50 y 100 kPa, N-SPT entre 15 y 50.
- Suelo Tipo E: velocidad de onda de corte menor a 180 m/s, arcillas blandas con IP mayor a 20 y humedad natural elevada, espesor de estrato mayor a 3 metros y S_u menor a 50 kPa.

2.1. INVENTARIO DE EDIFICACIONES

Los edificios en estudio presentan hasta tres pisos de altura y fueron construidos mayoritariamente entre los años 1977 y 2001, con ampliaciones estructurales posteriores. Durante este período estuvo vigente el Código Ecuatoriano de la Construcción de 1977 (CEC-77), utilizado como referencia normativa general para el diseño estructural en edificaciones formales.

Aunque las viviendas informales generalmente carecen de diseño estructural conforme al marco normativo, para efectos de análisis se ha optado por una clasificación proxy basada en la normativa vigente durante el periodo aproximado de construcción. Este enfoque permite establecer un nivel referencial de diseño estructural (sin implicar cumplimiento normativo) con el objetivo de contar con una base técnica replicable y estandarizable para el análisis masivo de edificaciones. Además, facilita la agrupación de unidades con técnicas constructivas y criterios estructurales comparables. Las condiciones particulares de vulnerabilidad (como la irregularidad geométrica, la deficiencia de confinamiento o la discontinuidad estructural) se evalúan en etapas posteriores mediante inspecciones detalladas y análisis de desempeño estructural.

Se identificó que el sistema estructural predominante corresponde a pórticos de hormigón armado con paredes de mampostería no reforzada, clasificados como tipo C3 según la taxonomía estructural propuesta por FEMA en los documentos FEMA 178, FEMA P-154, FEMA 356 y ASCE 41-17. Esta tipología, común en contextos autoconstruidos, presenta una vulnerabilidad sísmica considerable debido a la escasa interacción entre el marco estructural resistente y las paredes de relleno no confinadas. En la Tabla 1 se presenta el inventario general de edificaciones clasificadas según su nivel de diseño estructural aproximado.

Tabla 1 Inventario de edificaciones considerando el nivel de diseño aproximado.

#	Clase / Tipo	Descripción	Rango de altura		Nivel de diseño		Cantidad
			Nombre	Pisos	Código	Nivel	
1	C3L_PRE	Pórticos de hormigón armado rellenos con paredes de mampostería sin refuerzo	Poca altura	1-3	CNC-1952	PRE	1
2	C3L_BAJO		Poca altura	1-3	CEC-1977	BAJO	2306
3	C3L_MEDIO		Poca altura	1-3	CEC-2000	MEDIO	157
4	C3L_ALTO		Poca altura	1-3	NEC-15	ALTO	5

En esta clasificación, el nivel PRE corresponde a edificaciones construidas antes del CEC-77, sin regulación moderna; BAJO se refiere a aquellas construidas bajo los criterios básicos del CEC-77, con exigencia sísmica limitada; MEDIO identifica edificaciones que incorporaron parcialmente disposiciones del CEC-2000; y ALTO incluye aquellas que adoptaron, aunque no necesariamente cumplieron en su totalidad, los lineamientos mínimos establecidos por la NEC-15. Estos niveles no representan un cumplimiento normativo real, sino un indicador referencial del contexto técnico en el que fueron construidas las edificaciones. Su utilidad es comparativa y permite establecer prioridades para la evaluación e intervención estructural.

2.2. OBJETIVOS DE DESEMPEÑO PARA LA EVALUACIÓN Y REHABILITACIÓN SÍSMICA

Los edificios de vivienda analizados corresponden a una categoría de riesgo II, conforme a la clasificación establecida en la norma ASCE 41-17. De acuerdo con la Norma Ecuatoriana de la Construcción, capítulo NEC-SE-DS (MIDUVI, 2015a), estas edificaciones se consideran estructuras ordinarias, es decir, no están clasificadas como esenciales ni de ocupación especial.

En consecuencia, se selecciona de forma conservadora para el análisis un objetivo de desempeño de Seguridad de Vida 3-C, asociado a un nivel de amenaza sísmica BSE-1E, correspondiente a un evento de amenaza moderada con un período de retorno promedio de 225 años (Tabla 2). Según los criterios establecidos por ASCE 41-17, esta combinación exige que los componentes estructurales cumplan con los requerimientos del nivel de desempeño S-3 (seguridad

de vida estructural), mientras que los componentes no estructurales deben cumplir con los requerimientos del nivel N-C (protección de vida).

El alcance de esta investigación se limita a la evaluación y rehabilitación de los componentes estructurales. Por tanto, los requisitos de desempeño no estructural se consideran únicamente como parte del contexto normativo, pero no son objeto de análisis en este estudio.

Tabla 2 Niveles de amenaza sísmica para la evaluación y rehabilitación.

Evento Sísmico	Periodo de retorno promedio (años)
Ocasional (moderado). 20%/50años (BSE-1E)	225
Raro (severo). 10%/50años (BSE-1N)	475

Con base en estos criterios, la Figura 1 presenta los espectros de aceleración y desplazamiento correspondientes al nivel de amenaza sísmica BSE-1E, calculados conforme a la NEC-SE-DS. Estos se comparan con los espectros de diseño sísmico para edificaciones nuevas bajo el nivel de amenaza BSE-1N.

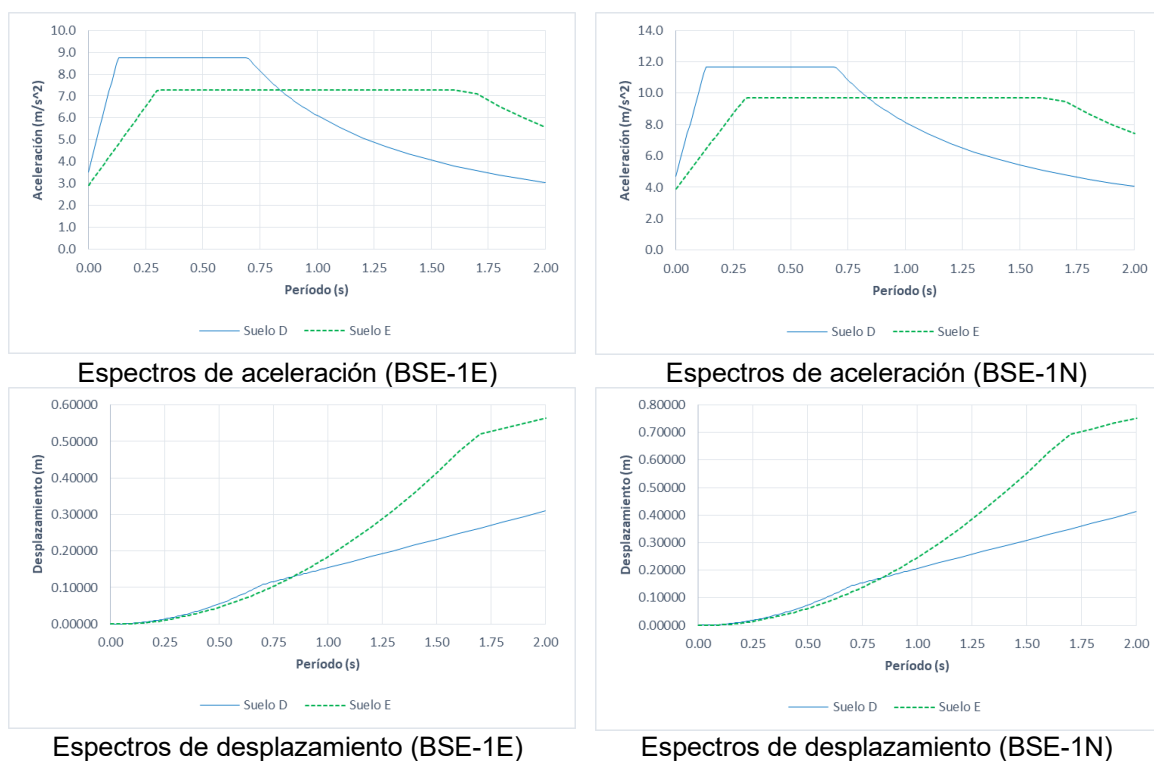


Figura 1 Espectros de aceleración y desplazamiento para Quito para suelo tipo D y E.

2.3. PROTOTIPOS

Las construcciones analizadas presentan superficies en planta baja que varían entre 44 m² y 260 m². Si bien no siguen un diseño estandarizado, es posible agruparlas en siete tipologías representativas, considerando la distribución ortogonal de sus ejes estructurales, así como la cantidad y distancia entre ellos.

Esta clasificación se fundamenta en un análisis geométrico y funcional realizado durante la inspección visual (Evaluación Nivel 1), que permitió identificar configuraciones recurrentes dentro del parque edificado informal del sector. La agrupación facilita la modelación de prototipos estructurales representativos y el diseño de estrategias de rehabilitación adaptadas a cada tipo de vivienda, considerando características estructurales comunes como el sistema de losa, el número de vanos y la simetría en planta.

En la Figura 2 se presenta de forma esquemática la configuración en planta de las siete tipologías identificadas. Cada esquema incluye información sobre la superficie estimada, la distribución de elementos estructurales y las dimensiones predominantes, lo cual permite establecer una base comparativa para su posterior análisis estructural.

Estas tipologías fueron seleccionadas para ser modeladas y evaluadas en profundidad en las siguientes etapas del estudio, sirviendo como referencia para el dimensionamiento y validación de las soluciones de refuerzo.

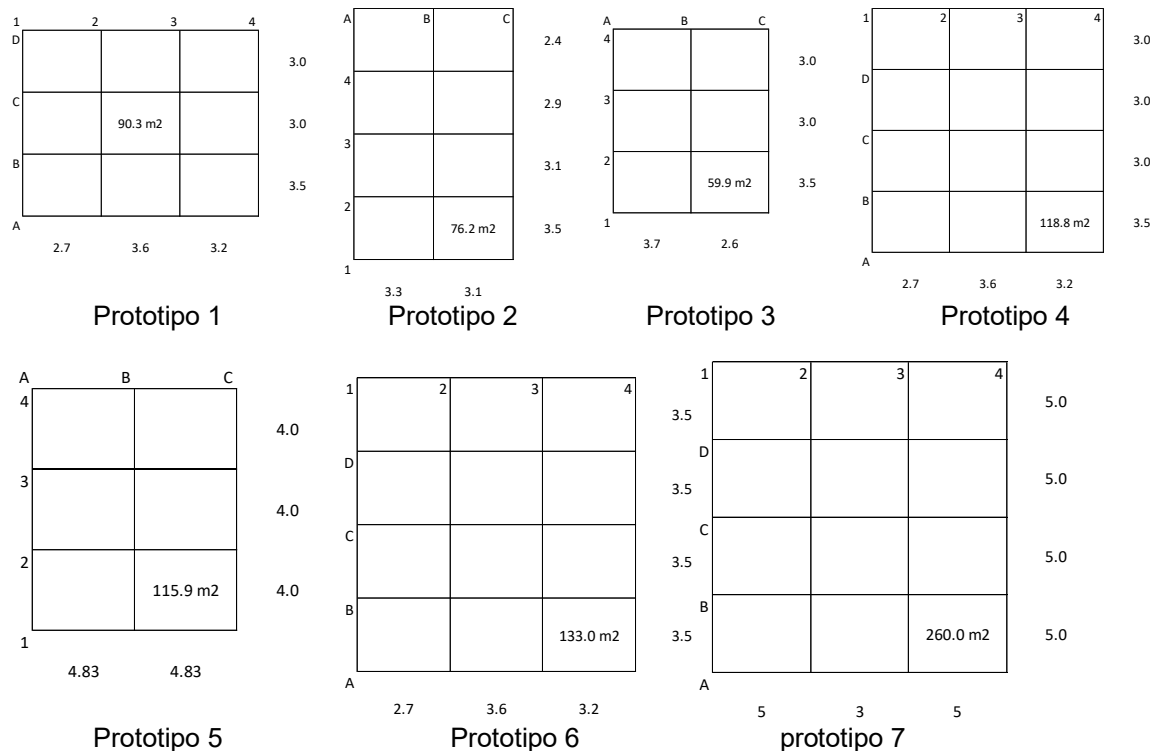


Figura 2 Configuración en planta de prototipos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El 100% de las construcciones estudiadas son vulnerables de acuerdo con un diagnóstico preliminar (evaluación de nivel 1) que consiste en una evaluación visual rápida como se propone con la norma FEMA P-154, y el Manual de procedimiento administrativo y técnico para la evaluación de las edificaciones de propiedad del Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI, 2022); principalmente porque el sistema estructural son pórticos de hormigón armado rellenos con paredes de mampostería sin refuerzo tipo C3 por lo que se necesita de una evaluación detallada (evaluación de nivel 2) para estudiar con más detalle la vulnerabilidad de las construcciones.

3.1. CURVAS DE CAPACIDAD

Se determinan las curvas de capacidad para cada prototipo de acuerdo con lo propuesto de Hazus (Figura 3). Las curvas representan el comportamiento de cada tipología, se construyen a partir de los parámetros de desplazamiento (D) y aceleración (A) para los puntos de fluencia (D_y y A_y) y capacidad última (D_u y A_u). El periodo de vibración se calcula con la ecuación (1.0).

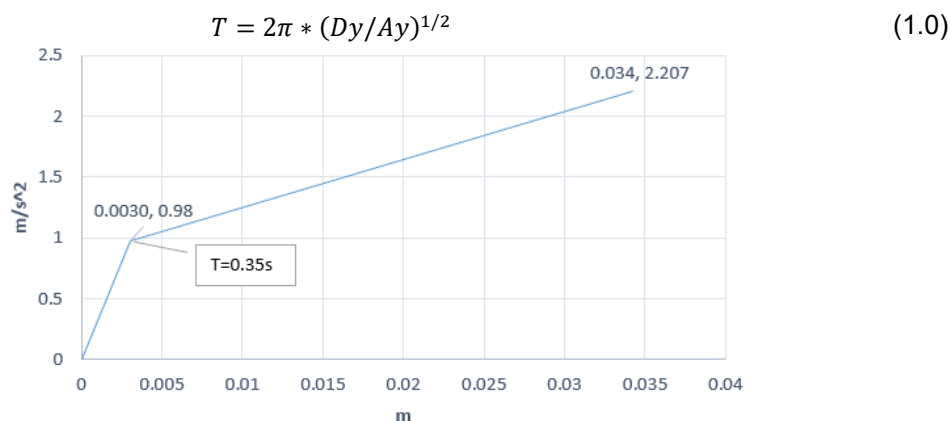
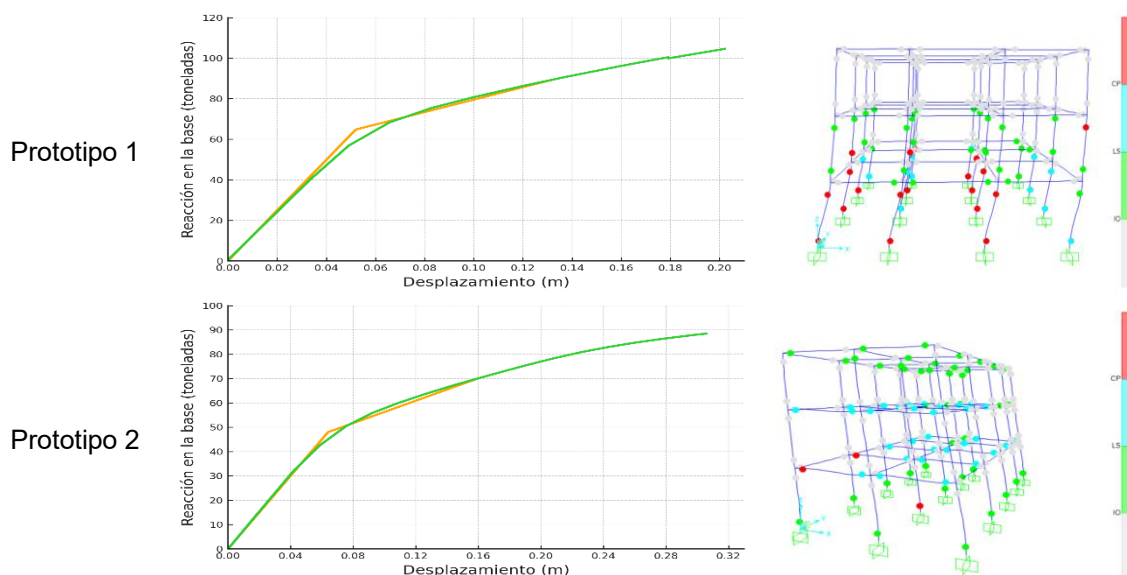


Figura 3 Curva de capacidad, estructuras tipo C3L y diseño PRE, BAJO, MEDIO Y ALTO.

En la figura 4 se muestran las curvas de capacidad (unidades toneladas y metros) de los prototipos acompañados con el mecanismo de formación de rótulas plásticas en la dirección crítica de análisis (transversal). El modelo matemático se elabora con elementos finitos tipo barra para columnas y vigas con un modelo de plasticidad concentrada integrado de acuerdo con ASCE 41-17 y elementos tipos link para simular las mamposterías como bielas, se trata de un macro modelo simplificado con una sola diagonal que trabaja únicamente en compresión y uno dos pisos adyacentes, para determinar las características de la diagonal equivalente se utiliza las expresiones adoptadas por FEMA 356. Se analiza cada prototipo mediante un análisis no lineal tipo pushover para obtener la curva de capacidad global.



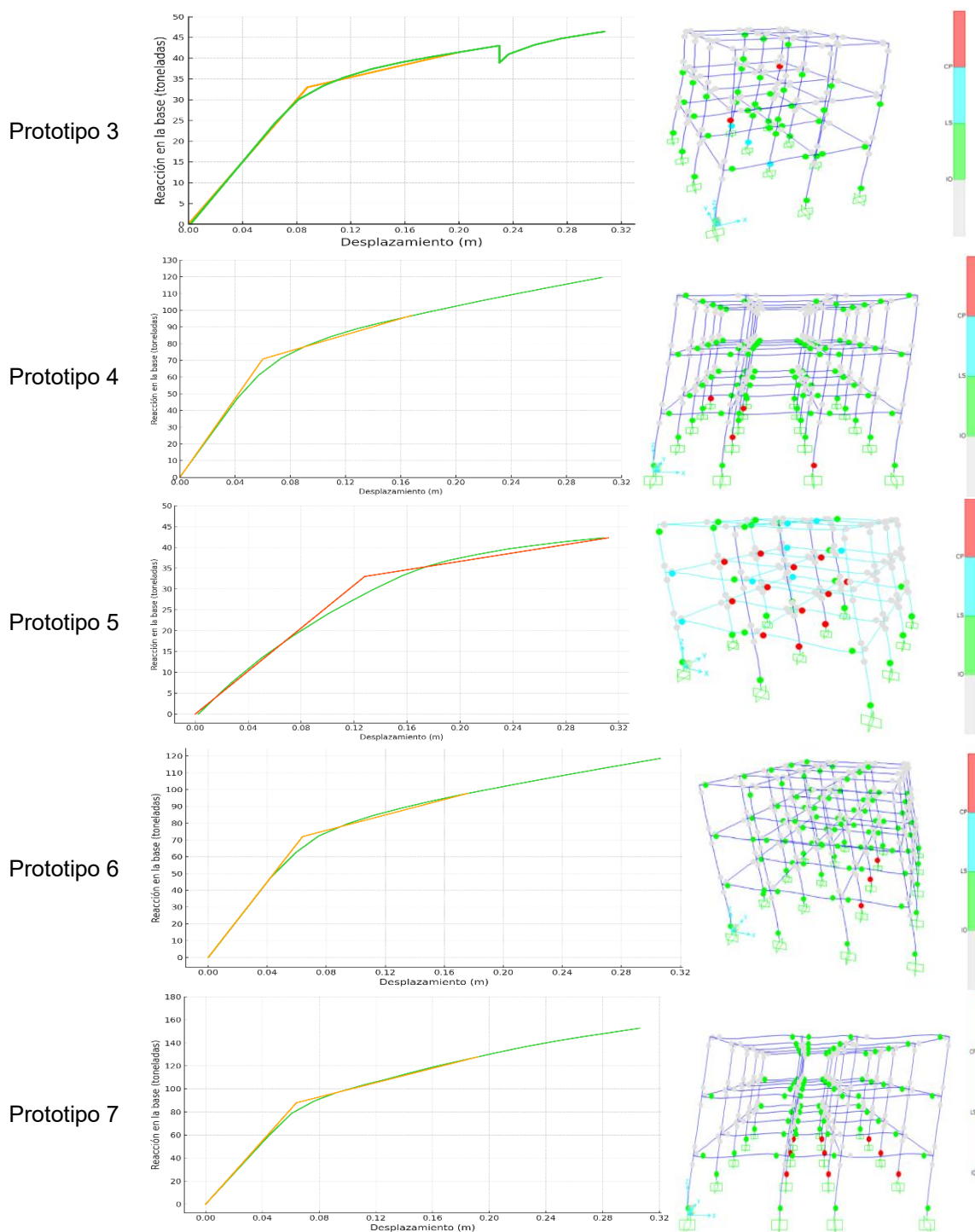


Figura 4 Curvas de capacidad y rótulas plásticas en sentido transversal.

3.2. PROBABILIDAD DE DAÑO

Se estima la probabilidad de que el tipo de edificio alcance un determinado nivel de daño ante la acción sísmica. Para el cálculo se aplica el Método de Coeficiente de Desplazamiento

Mejorado (IDCM) de acuerdo con FEMA 440, se estima el desplazamiento global máximo (δ), que es la suma de desplazamientos elástico e inelástico, y que se considera para construir las curvas de fragilidad.

Se parte del periodo efectivo (T) y se obtiene la aceleración espectral (S_a) del espectro de demanda construido para Quito para una amenaza sísmica de nivel (BSE-1E), esta aceleración es la demanda de aceleración espectral $S_a^{(cl)}$ del sistema lineal equivalente de un grado de libertad (SDOF). La demanda máxima de desplazamiento espectral $S_d^{(cl)}$ se determina con la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**. Los resultados de muestran en la Tabla 3.

$$S_d^{(cl)} = (T^2/4\pi^2)S_a^{(cl)} \quad (2.0)$$

Para calcular la demanda de desplazamiento global (δ), desplazamiento objeto a nivel del techo (Tabla 4), se modifica la respuesta elástica lineal por los coeficientes calculadas con las ecuaciones **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** que incluyen la tasa de desplazamiento máximo y el ajuste por degradación cíclica de cada estructura.

$$\delta 1 = C1 * C2 * S_d^{(cl)} \quad (3.0)$$

$$C1 = 1 + \frac{R - 1}{\alpha * T e^2} \quad (4.0)$$

$$C2 = 1 + \frac{1}{800} \left(\frac{R - 1}{T e} \right)^2 \quad (5.0)$$

$$R = \frac{S_a^{(cl)}}{A_y} \quad (6.0)$$

$C1$ es coeficiente de relación del desplazamiento máximo esperado de un oscilador no lineal con propiedades histéricas elásticas perfectamente plásticas con la demanda de desplazamiento máximo del oscilador lineal, si el período es mayor que 1.0s, $C1=1.0$; $C2$ es el coeficiente que representa el comportamiento histérico y su degradación de rigidez en la respuesta del desplazamiento máximo, si el período es mayor que 0.7s, $C2=1.0$; R es el porcentaje de demanda de resistencia elástica con respecto a la capacidad de resistencia elástica calculada; α es un valor constante 60 para suelos tipo D y E; y T_e es el periodo efectivo.

Tabla 2 Demanda de aceleración y desplazamiento espectral para suelos tipo D y E.

Tipo	T	Suelo Tipo D		Suelo Tipo E	
	(s)	$S_a^{(cl)}$ (m/s ²)	$S_d^{(cl)}$ (m)	$S_a^{(cl)}$ (m/s ²)	$S_d^{(cl)}$ (m)
C3L	0.35	8.75	0.027	7.29	0.023

Tabla 3 Demanda de desplazamiento global para suelos tipo D y E.

Tipo	T	A _y	Suelo Tipo D						Suelo Tipo E					
	(s)	(m/s ²)	$S_a^{(cl)}$ (m/s ²)	$S_d^{(cl)}$ (m)	R	C1	C2	δ (cm)	$S_a^{(cl)}$ (m/s ²)	$S_d^{(cl)}$ (m)	R	C1	C2	δ (cm)
C3L	0.35	0.98	8.75	0.027	8.9	2.07	1.63	9.3	7.29	0.023	7.4	1.87	1.42	6.0

3.3. CURVAS DE FRAGILIDAD

La probabilidad de alcanzar o de exceder un nivel de daño se modela como una distribución normal estándar logarítmica acumulada. Para el daño estructural para una demanda de desplazamiento espectral S_d , la probabilidad de exceder el nivel de daño se modela con la ecuación

¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., donde $\bar{Sd}$ es la media del valor del desplazamiento espectral asociado al límite de daño d_s , Beta es la desviación estándar del logaritmo natural del desplazamiento espectral para un nivel de daño d_s , y ϕ es la función de distribución normal estándar logarítmica acumulada.

$$P[d_s|Sd] = \phi \left[\frac{1}{\text{Beta}} \ln \left(\frac{Sd}{\bar{Sd}} \right) \right] \quad (7.0)$$

Para cada clase de vulnerabilidad y nivel de la acción sísmica se calculan curvas de fragilidad considerando la escala de daño propuesta por Hazus (FEMA, 2022) con cuatro niveles de daño: Leve, Moderado, Extenso y Completo. Para estimar la probabilidad de daño se relaciona las demandas de desplazamiento global (δ) con las curvas de fragilidad considerando un tipo de suelo D y E respectivamente.

La Figura 5 muestra las curvas de fragilidad obtenidas mediante análisis pushover, adaptando la metodología de HAZUS (FEMA, 2022) para los prototipos estructurales tipo C3 construidos sobre suelos tipo D y tipo E. Estas curvas representan la probabilidad acumulada de que una edificación alcance al menos un determinado nivel de daño (nulo, leve, moderado, extenso o completo) frente a distintas demandas sísmicas, expresadas como desplazamiento máximo en la parte superior de la edificación. En la Figura 6 se presenta la probabilidad de daño en porcentajes.

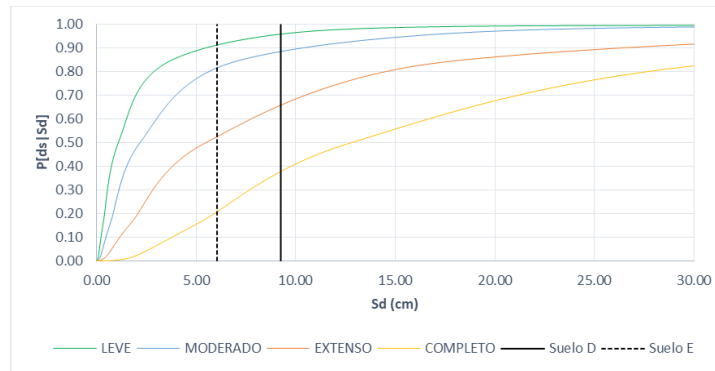


Figura 5 Curvas de fragilidad para estructuras tipo C3L.

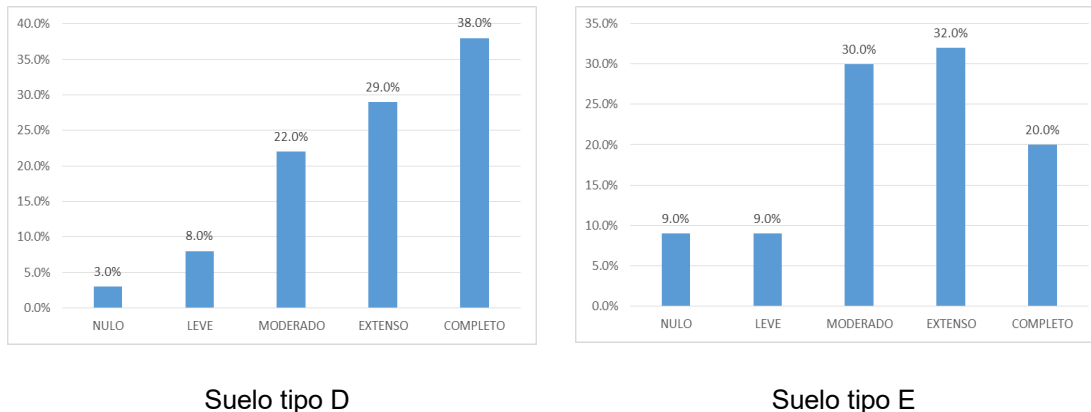


Figura 6 Probabilidad de daño.

Para el suelo tipo D, el desplazamiento máximo alcanzado es de 9.25 cm, y la probabilidad de que la estructura sufra al menos daño severo (extenso o completo) es del 67.0 %. En el caso del suelo tipo E, aunque el desplazamiento es menor (6.04 cm), la probabilidad acumulada de alcanzar niveles severos de daño sigue siendo elevada (52.0 %). Esta condición evidencia la alta vulnerabilidad sísmica del parque construido, aún bajo demandas sísmicas de amenaza moderada.

Estas curvas confirman que las edificaciones informales tipo C3 no cumplen con el objetivo de desempeño de Seguridad de Vida bajo la amenaza sísmica BSE-1E, ya que presentan altas probabilidades de daño crítico. Por lo tanto, se justifica la implementación de medidas de rehabilitación estructural que mejoren su desempeño sin alcanzar estados de colapso, conforme a los criterios establecidos en la NEC-SE-RE (MIDUVI, 2015b) y ASCE 41-17 (2017).

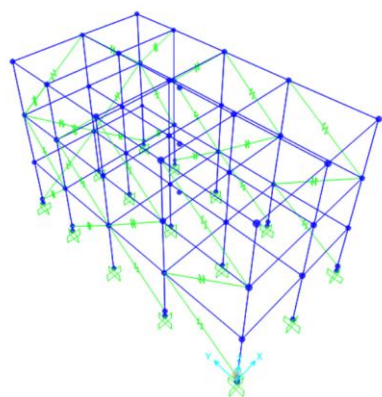
3.3. DESEMPEÑO SÍSMICO DE LAS ESTRUCTURAS REHABILITADAS

Para validar la propuesta de rehabilitación sísmica a nivel de tipologías estructurales se evalúa el desempeño sísmico de la estructura rehabilitada realizando análisis lineales con base en el método de las fuerzas de modo que toda la estructura rehabilitada sea capaz de resistir un nivel de amenaza sísmica BSE-1E sin exceder las derivas máxima permitidas por la norma NEC-15 y se compara las derivas máximas calculadas con los límites de deriva propuestos por FEMA-356, Ghobarah (2004) para los diferentes niveles de daño. Los criterios se muestran en la Tabla 5.

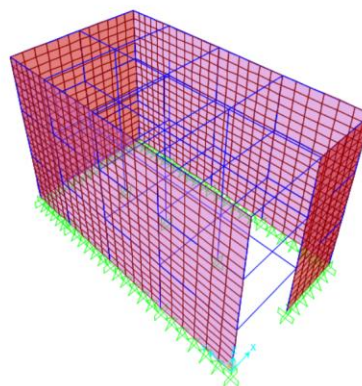
Tabla 4 Criterios para la evaluación del desempeño estructural.

Referencia	Cercano al colapso	Daño extenso (seguridad de vida)	Daño moderado (operacional)	Poco daño (completamente operacional)
FEMA-356	2.5%	1.5%	0.5%	0.2%
Ghobarah (No dúctiles)	>1%	0.8%	<0.5%	0.2%

Para los casos en estudio se evalúa el desempeño estructural en dos condiciones la primera considerando la estructura sin rehabilitar y la segunda considerando la estructura rehabilitada (Figura 7). Para el análisis de las estructuras sin rehabilitar se incluye un modelo de mamposterías como bielas, que se trata de un macro modelo simplificado con una sola diagonal que trabaja únicamente en compresión y une dos pisos adyacentes, para determinar las características de la diagonal equivalente se utiliza las expresiones propuestas por FEMA 356. Para el caso de las estructuras rehabilitadas no se incluyen mamposterías y se incluye un modelo de enchapes con elementos finitos tipo Shell.



Estructura sin rehabilitar



Estructura rehabilitada

Figura 7 Modelos matemáticos.

En las Figuras 8 y 9 se ilustra la relación entre la deriva y el desempeño sísmico de las edificaciones sin rehabilitar, evaluadas en suelos tipo D y E. Según los niveles de daño propuestos por FEMA-356, se observa que el desempeño sísmico en la dirección transversal supera el nivel de daño moderado y se aproxima al daño extenso. En la dirección longitudinal, el desempeño se sitúa entre poco daño y daño moderado.

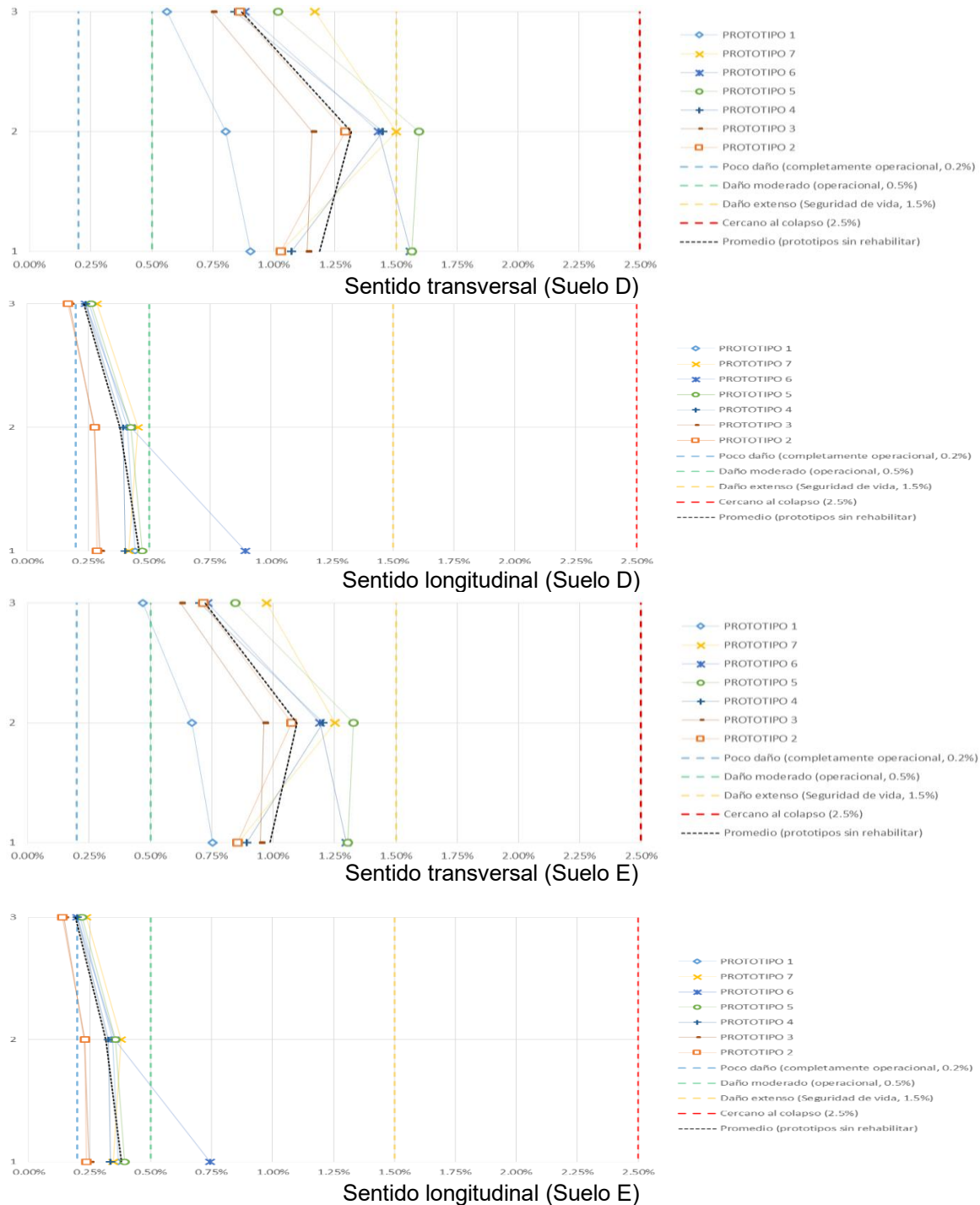


Figura 8 Derivas y desempeño estructural de las construcciones sin rehabilitar (FEMA 356).

Según los niveles de daño propuestos por Ghobarah (2004) para estructuras no dúctiles, el desempeño sísmico de las edificaciones sin rehabilitar excede el nivel de daños extensos y alcanza el nivel de colapso en la dirección transversal. En la dirección longitudinal, el desempeño se aproxima al nivel de daño moderado.

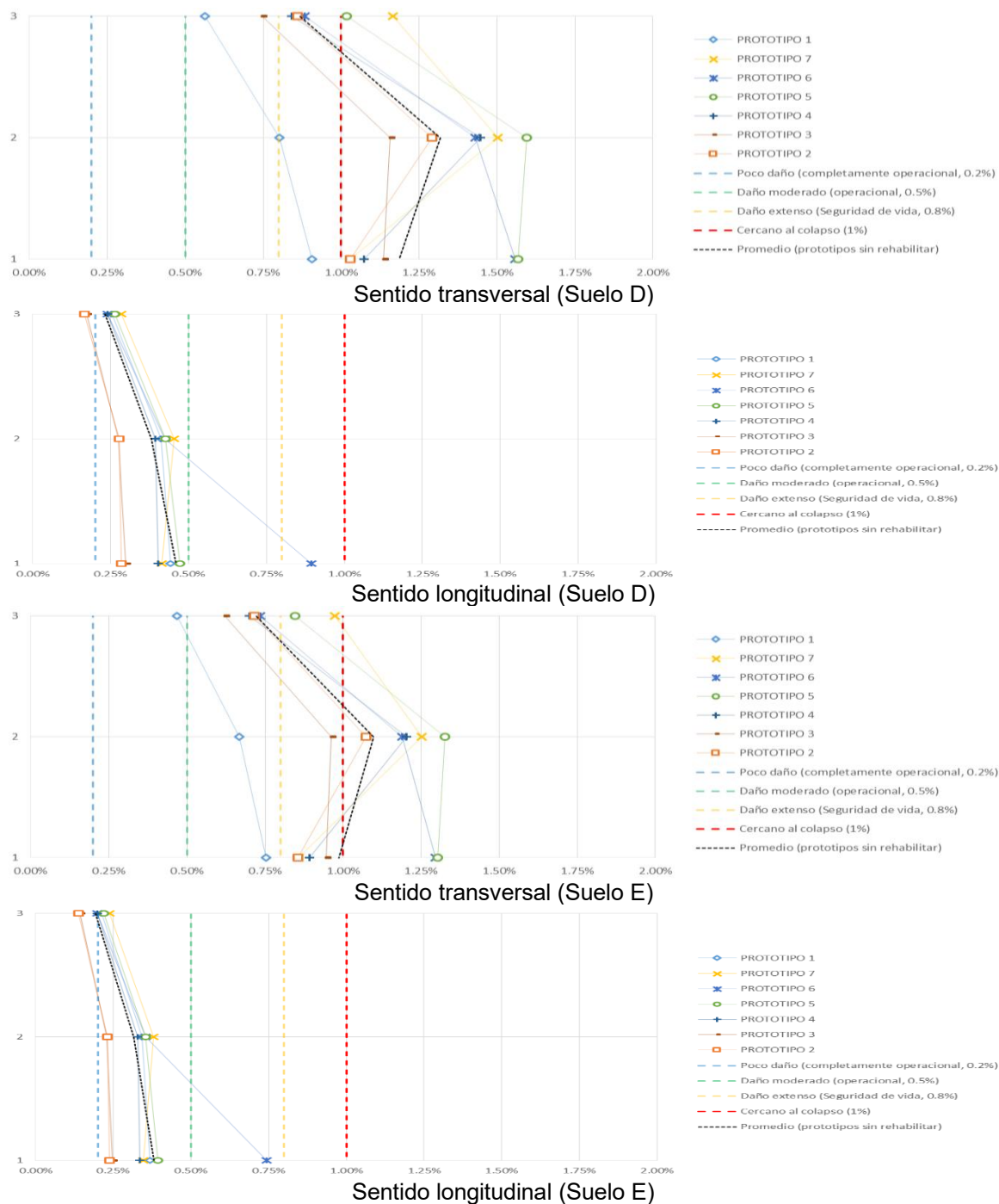


Figura 9 Derivas y desempeño estructural de las construcciones sin rehabilitar (Ghobarah).

En las Figuras 10 y 11 se presenta la relación entre la deriva y el desempeño sísmico de las edificaciones rehabilitadas en suelos tipo D y E. En el sentido transversal, el desempeño sísmico se aproxima al nivel de poco daño, mientras que en el sentido longitudinal también se acerca al nivel de poco daño, de acuerdo con los niveles de daño propuestos por la metodología del FEMA-356.

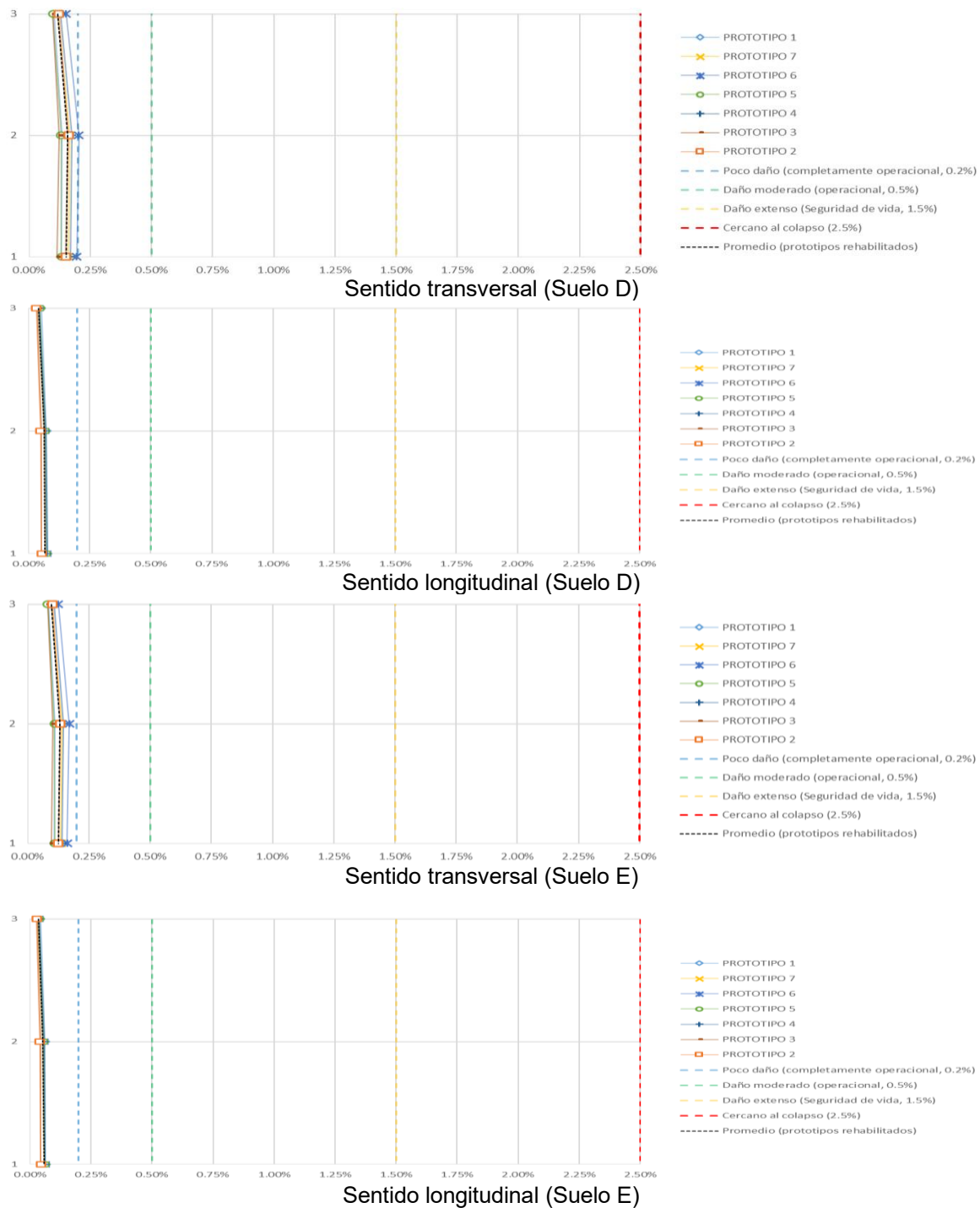


Figura 10 Derivas y desempeño estructural de las construcciones rehabilitadas (FEMA 356).

El desempeño sísmico en ambas direcciones alcanza el nivel de poco daño según los niveles de daño establecidos por Ghobarah (2004) para estructuras no dúctiles.

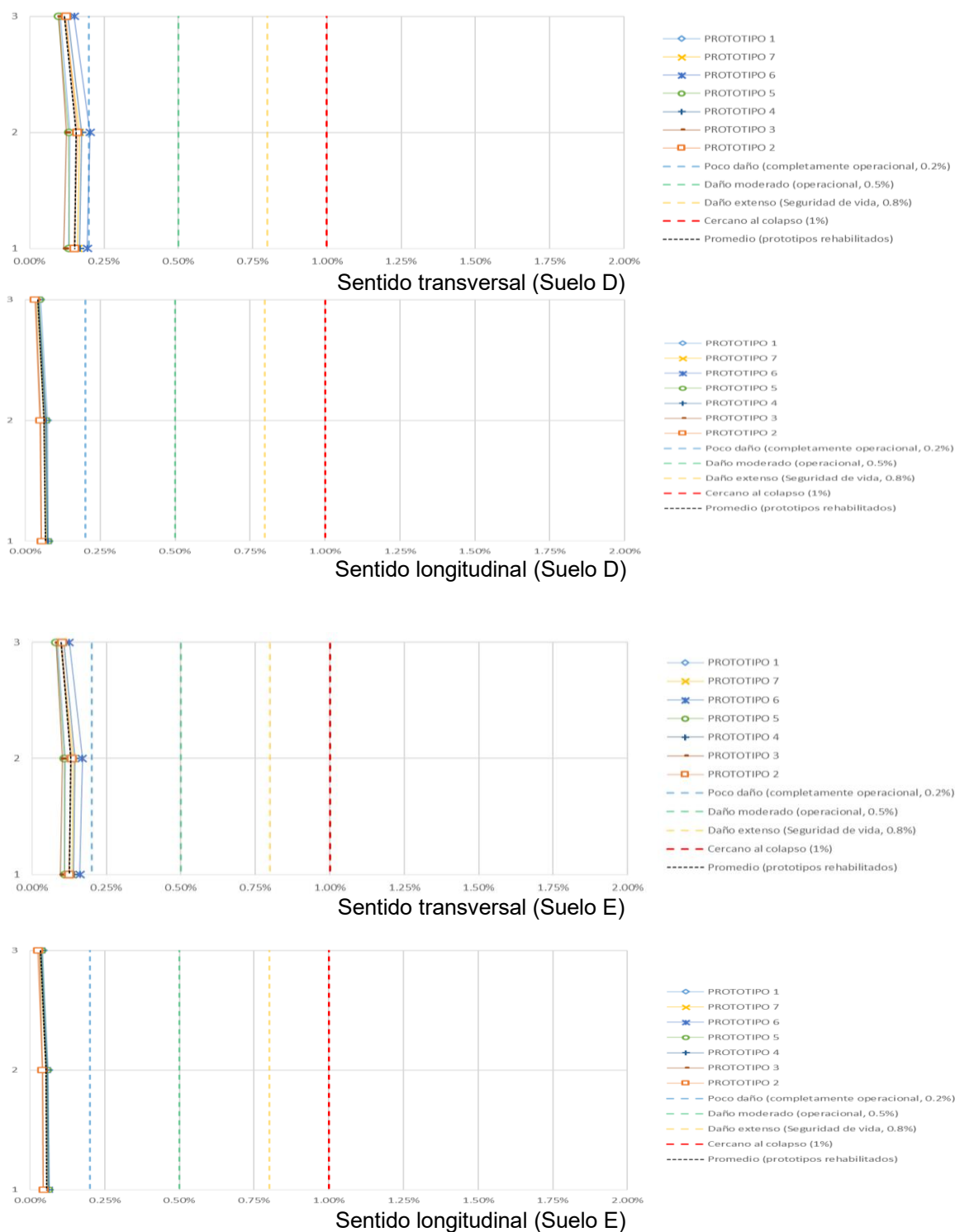


Figura 11 Derivas y desempeño estructural de las construcciones rehabilitadas (Ghobarah).

3.4. DISCUSIÓN

En las edificaciones informales evaluadas, el sistema estructural predominante está constituido por pórticos de hormigón armado con losas planas, una tipología común en Ecuador debido a su facilidad constructiva. Bajo condiciones normativas, estos sistemas poseen capacidad de disipar energía a través de mecanismos dúctiles que se activan al alcanzar derivas importantes (Benavent-Climent, Reyes, & Gallego, 2019). No obstante, esta respuesta controlada se ve alterada en contextos informales por la incorporación no diseñada de muros de mampostería no reforzada, los cuales presentan una rigidez en el plano considerablemente mayor y absorben fuerzas sísmicas desde las primeras fases del movimiento. Esta interacción temprana provoca fisuración y pérdida de capacidad en los muros antes de que los marcos comiencen a comportarse inelásticamente, lo que genera modos de falla prematuros, típicamente localizados en los primeros niveles (Guerrero & Suárez-Sánchez, 2025). Esta condición se ha identificado en múltiples eventos sísmicos recientes como el de México 2017 y Ecuador 2016, en los que se observaron mecanismos de piso débil y colapsos parciales asociados a la coexistencia inadecuada de ambos sistemas estructurales (Buendía Sánchez & Reinoso Angulo, 2019; Herrera, Gómez, Parra, Arévalo, Guaminga, & Hernández, 2022). Estos hallazgos son consistentes con los resultados experimentales de Benavent-Climent, Reyes, & Gallego (2019), quienes documentaron el colapso por agotamiento energético en estructuras con losas planas, evidenciando que la mayor parte de la disipación se concentra en las conexiones losa-columna exteriores bajo acción sísmica bidireccional.

Una de las limitaciones más críticas en la evaluación de edificaciones informales en este estudio es la imposibilidad de verificar visualmente la continuidad estructural entre columnas y losas, debido a la ausencia de planos o registros técnicos. Esta continuidad es esencial para garantizar una adecuada transferencia de cargas verticales y horizontales, así como para asegurar que la estructura actúe como un sistema integral bajo acción sísmica. En el presente estudio, se asumió la continuidad entre los elementos verticales y horizontales como condición base para la modelación estructural, práctica aceptada cuando no se cuenta con datos verificables, siguiendo precedentes de trabajos en zonas urbanas informales (Placencia & Paredes, 2017). Sin embargo, esta suposición debe ser validada durante la ejecución del reforzamiento mediante inspecciones destructivas o semidestructivas. De confirmarse la existencia de discontinuidades, será necesario implementar detalles constructivos que garanticen la transferencia efectiva de esfuerzos, como anclajes embebidos o conexión por encamisado.

El análisis de desempeño realizado en este estudio se enfocó exclusivamente en la superestructura, debido a la ausencia de información precisa sobre las condiciones de cimentación de las viviendas analizadas. Esta situación es frecuente en contextos de construcción informal, donde no existen planos estructurales, memorias técnicas ni expedientes de obra. Ante esta limitación, se optó por modelar una cimentación típica basada en parámetros geotécnicos representativos del entorno urbano de Quito, como práctica común en evaluaciones preliminares (Guerrero & Suárez-Sánchez, 2025). Sin embargo, se reconoce que la variabilidad en profundidad, tipo y rigidez de las cimentaciones puede influir significativamente en el desempeño sísmico global, por lo que, en contextos de rehabilitación de edificios individuales, los estudios de vulnerabilidad estructural deben incluir inspecciones in situ, calicatas y ensayos geotécnicos que permitan caracterizar adecuadamente los elementos de fundación (MIDUVI, 2015c). Esta verificación es especialmente crítica cuando se proyectan intervenciones de refuerzo que puedan alterar el esquema de cargas verticales o la distribución de esfuerzos hacia el terreno.

El sistema de reforzamiento aplicado mediante enchapes de concreto armado, conformado por malla electrosoldada y mortero, no solo mejora la capacidad resistente lateral de los muros, sino que también uniformiza la distribución de esfuerzos hacia las cimentaciones, especialmente en edificaciones con irregularidades geométricas o materiales heterogéneos (Herrera, Gómez, Parra, Arévalo, Guaminga, & Hernández, 2022). Este tipo de intervención favorece un comportamiento monolítico de la superestructura, promoviendo un efecto de caja que estabiliza el desplazamiento

relativo entre elementos verticales y horizontales, y reduce la concentración de esfuerzos locales. La consolidación del sistema portante tiende, además, a disminuir las diferencias de rigidez entre niveles y mitiga la aparición de asientos diferenciales al transmitir las cargas de forma más homogénea al terreno. Estos beneficios han sido confirmados tanto por simulaciones no lineales como por pruebas experimentales en modelos de escala reducida, reforzando la eficacia de este tipo de técnica para viviendas informales (Placencia & Paredes, 2017).

En el caso de edificaciones adosadas, se ha comprobado que la interacción dinámica entre estructuras con diferente rigidez o altura puede reducir significativamente la eficacia de las soluciones de reforzamiento aplicadas de manera individual. Cuando una vivienda reforzada se encuentra contigua a otra sin intervención, se produce una redistribución de la demanda sísmica hacia los elementos más rígidos, elevando su probabilidad de daño ante eventos sísmicos moderados o severos (Abdel Raheem, et al., 2020). Este efecto se ve agravado cuando existen diferencias en número de pisos o irregularidades geométricas entre las unidades vecinas, generando impactos laterales conocidos como *pounding*, que han sido responsables de daños localizados en sismos recientes en América Latina (Brzev et al., 2003; Buendía Sánchez & Reinoso Angulo, 2019; Villar-Vega et al., 2017). Por tanto, las estrategias de rehabilitación estructural en contextos urbanos densos deben concebirse a escala de bloque o conjunto, considerando la compatibilidad de rigidez, masa y altura entre edificaciones adyacentes, con el fin de evitar amplificaciones de demanda sísmica y fenómenos de interacción destructiva (BID, 2016; Guerrero & Suárez-Sánchez, 2025).

Las características de las rótulas plásticas definidas en la norma ASCE 41-17 se basan en el comportamiento de estructuras diseñadas bajo estándares normativos, con materiales controlados y detalles constructivos adecuados. Aunque estas propiedades son ampliamente reconocidas en evaluaciones sísmicas de edificaciones existentes, su aplicación directa a construcciones informales puede inducir a errores de interpretación, debido a la incertidumbre inherente en cuanto a calidad de materiales, continuidad estructural y ausencia de control técnico. No obstante, en esta investigación se ha adoptado una aproximación metodológica que ajusta de forma conservadora los resultados, considerando su aplicación a una evaluación masiva de viviendas informales, donde se prioriza la detección de vulnerabilidad estructural en estructuras con capacidad limitada de disipación de energía. Esta estrategia busca reducir el riesgo de sobreestimación del desempeño, aplicando criterios compatibles con tipologías de baja ductilidad y pobre confinamiento. Diversos estudios han sugerido que en estos contextos resulta conveniente complementar los estados límite normativos con observaciones empíricas, análisis de vulnerabilidad locales y calibraciones de modelos no lineales en función del estado real observado (Guerrero, Terán-Gilmore, Ji, & Escobar, 2017; Ghobarah, 2004).

La construcción de curvas de fragilidad sísmica para edificaciones informales está sujeta a múltiples fuentes de incertidumbre que pueden comprometer la confiabilidad de los resultados. Entre las más relevantes se encuentran: (1) la idealización del modelo estructural y su fidelidad respecto a la realidad constructiva; (2) la variabilidad de los parámetros de amenaza sísmica, como la aceleración, duración y contenido de frecuencia; y (3) la heterogeneidad de materiales y procesos constructivos característicos de edificaciones sin supervisión técnica (Guerrero, Terán-Gilmore, Ji, & Escobar, 2017). Estas incertidumbres pueden alterar significativamente la estimación del daño proyectado y, por ende, afectar la clasificación del riesgo estructural. En esta investigación, se ha adoptado un enfoque estandarizado y representativo, adecuado para evaluaciones masivas, que permite identificar patrones de vulnerabilidad estructural en un amplio conjunto de viviendas con tipologías similares. No obstante, para estudios aplicados a casos individuales, se recomienda incorporar análisis de sensibilidad probabilística y validaciones empíricas (Zhong, Zhang, Zhi, & Fan, 2019).

La implementación efectiva de medidas de rehabilitación exige la desocupación temporal de las viviendas, lo que implica la necesidad de coordinar soluciones logísticas y financieras que garanticen tanto la seguridad de los ocupantes como la continuidad del proceso técnico. Experiencias

en ciudades andinas han demostrado la viabilidad de este proceso mediante convenios interinstitucionales que permiten reubicaciones temporales mediante vivienda transitoria o subsidios municipales (BID, 2016). Esta investigación aporta una base técnica replicable para enfrentar el déficit cualitativo de vivienda en ciudades andinas con alto riesgo sísmico.

4. CONCLUSIONES

Este estudio desarrolló una metodología integral para la evaluación y rehabilitación sísmica de viviendas informales de hasta tres pisos en el sur de Quito, aplicable a contextos urbanos de alta vulnerabilidad. Se analizaron 2469 edificaciones mediante inspecciones visuales, modelación estructural no lineal y el uso de curvas de capacidad y fragilidad, identificando siete tipologías representativas.

Los resultados muestran que más del 50 % de las viviendas analizadas presentan un desempeño estructural insuficiente bajo niveles de amenaza sísmica moderada (BSE-1E), con probabilidades significativas de daño severo o colapso, particularmente en suelos tipo D y E. Esta vulnerabilidad se agrava por condiciones como la ausencia de diseño técnico, la deficiente interacción entre pórticos y mampostería, y la falta de continuidad estructural.

Se propuso como solución de refuerzo el uso de enchapes de concreto armado con malla electrosoldada, técnica que demostró una mejora sustancial en el desempeño estructural. Específicamente, se observó una reducción promedio del 60 % en las derivas máximas, un incremento del 45 % en la rigidez lateral y una disminución significativa en la probabilidad de colapso. Los resultados se obtuvieron a partir de análisis estáticos no lineales tipo pushover aplicados a modelos representativos calibrados por tipología estructural.

Estos resultados permitieron que los prototipos cumplan con el objetivo de desempeño “seguridad de vida”. El modelo estructural rehabilitado presentó un comportamiento sísmico que se mantuvo dentro del rango de daño leve, validado mediante análisis comparativos con los límites establecidos por FEMA-356 y Ghobarah (2004).

Asimismo, se identificaron riesgos adicionales en viviendas adosadas, donde intervenciones aisladas pueden generar efectos adversos por diferencias de rigidez y altura. En consecuencia, se recomienda planificar intervenciones a escala de conjunto, integrando criterios de compatibilidad estructural entre edificaciones colindantes.

Las curvas de fragilidad generadas en este estudio constituyen una herramienta útil y válida para la evaluación comparativa y priorización de intervenciones en contextos de gran escala. Su aplicación resulta especialmente adecuada en diagnósticos masivos como el realizado en este caso, donde se requieren estimaciones estandarizadas para una gran cantidad de viviendas.

No obstante, cuando se trata de diseñar intervenciones específicas a nivel de edificio individual, es necesario complementar esta herramienta con análisis más detallados, considerando variables como la calidad constructiva, la amenaza sísmica local y los niveles de incertidumbre del modelo estructural. En estos casos, se recomienda realizar análisis de sensibilidad y validaciones empíricas que refuercen la confiabilidad de los resultados.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Universidad Internacional Iberoamericana (UNINI) por su apoyo en el programa de Doctorado en Proyectos. Su contribución ha sido fundamental para el desarrollo de esta investigación y la obtención de resultados significativos.

A las empresas ecuatorianas SIBHIALTA Cia. Ltda. y A&P INGENSERVI Cia. Ltda., por su apoyo principalmente en la etapa de obtención de los registros de inspecciones de las viviendas en estudio.

A Patricio Placencia por sus comentarios y activas recomendaciones sobre el uso de enchapes como una alternativa de rehabilitación de viviendas informales.

6. REFERENCIAS

- Abdel Raheem, S. E., Fooly, M. Y. M., Abdel Shafy, A. G. A., Abbas, Y. A., Omar, M., Abdel Latif, M. M. S., & Mahmoud, S. (2018). Seismic pounding effects on adjacent buildings in series with different alignment configurations. *Steel and Composite Structures*, 28(3), 289–308. <https://doi.org/10.12989/scs.2018.28.3.289>
- Aguiar, R., Rivas-Medina, A., Caiza, P., Quizanga, D., (2017). Control spectra for Quito. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, (17), 397-407. doi:10.5194/nhess-17-397-2017
- American Society of Civil Engineers (ASCE) (2017). *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings ASCE 41*. Virginia, Estados Unidos: ASCE.
- Banco Mundial, (2021). *Introducing the Adequate Housing Index (AHI): A New Approach to Estimate the Adequate Housing Deficit within and across Emerging Economies*, Policy Research Working Paper No. 9830.
- Benavent-Climent, A., Reyes, A., & Gallego, A. (2019). Energy capacity and seismic performance of RC waffle-flat plate structures under two components of far-field ground motions. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 48(6), 553–570. <https://doi.org/10.1002/eqe.3161>
- Celi, C., Pantoja, J., Sosa, D., Ayala, C., (2018). Vulnerabilidad sísmica de quito ecuador, fase i: curvas de capacidad de las tipologías estructurales, proyecto GEM – SARA. DOI: <https://doi.org/10.26807/revpuce.v0i106.130>
- Castillo Robles, C., Castillo, J., Placencia, P., Hernández, R., Herrera, M., Gómez C. (2022). Reforzamiento estructural en viviendas adosadas mediante recubrimiento de mampostería con malla electrosoldada y mortero. *Gaceta Técnica*, 23(2), 53–69. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8929219.pdf>
- Brzev, Svetlana & Tomažević, Miha & Lutman, Marjana & Bostenaru Dan, Maria & D'Ayala, Dina & Greene, Marjorie. (2003). *The World Housing Encyclopedia: An Online Resource on Housing Construction in High Seismic Risk Areas of the World*.
- Buendía Sánchez, L.M., & Reinoso Angulo, E. (2019). Análisis de los daños en viviendas y edificios comerciales durante la ocurrencia del sismo del 19 de septiembre de 2017. *Ingeniería sísmica*, (101), 19-35. Epub 30 de abril de 2020. <https://doi.org/10.18867/ris.101.508>
- Federal Emergency Management Agency (FEMA) (1992), *NEHRP Handbook for the Seismic Evaluation of Existing Buildings FEMA 178*. Estados Unidos: FEMA.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2022), *Hazus Earthquake Model Technical Manual Hazus 5.1*. Estados Unidos: FEMA.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2000), *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings FEMA 356*. Washington D.C., Estados Unidos: FEMA.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2005). *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures FEMA 440*. Washington D.C., Estados Unidos: Applied Technology Council (ATC) & Federal Emergency Management Agency (FEMA).

- Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2015). Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook FEMA P-154. Washington D.C., Estados Unidos: Building Seismic Safety Council (BSSC).
- Ghobarah, A. (2004), "On drift limits associated with different damage levels", International workshop on performance based seismic design. Department of Civil Engineering, Mc. Master University, June 28- July 1, 2004.
- Guerrero, H., Terán-Gilmore, A., Ji, T., & Escobar, J. A. (2017). Evaluation of the economic benefits of using Buckling-Restrained Braces in hospital structures located in very soft soils. *Engineering Structures*, 136, 406-419.
- Guerrero, P., Mota-Páez, S., Escolano, D. (2024). Seismic Rehabilitation of a Soft Story Structure with Hysteretic Dampers. In: Saavedra Flores, E.I., Astroza, R., Das, R. (eds) Recent Advances on the Mechanical Behaviour of Materials. ICM 2023. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 462. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-53375-4_12
- Guerrero, P., Suárez-Sánchez, M. (2025). Metodología de evaluación y rehabilitación sísmica para viviendas informales en la ciudad de Quito. *Sinergia Académica*, 8(Especial 1), 369-391. <https://doi.org/10.51736/3z7w8h13>
- Habib, A., Yildirim, U., & Eren, O. (2020). Column repair and strengthening using RC jacketing: A brief state-of-the-art review. *Innovative Infrastructure Solutions*, 5(75). <https://doi.org/10.1007/s41062-020-0281-6>
- Herrera, M., Gómez, C., Parra, G., Arévalo, D., Guaminga, E., & Hernández, L. (2022). Análisis del reforzamiento de una estructura construida informalmente mediante el uso de enchapes. *Gaceta Técnica*, 23(2), 4-22. Epub 27 de abril de 2023. <https://doi.org/10.51372/gacetatecnica232.2>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) (2017). Anuario de Estadísticas de Edificaciones 2017. Ecuador: INEC.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) (2019). Encuesta de Edificaciones 2018. Ecuador: INEC.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) (2024). VIII Censo de Población y VII de Vivienda 2022. Ecuador: INEC.
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI) (2015a). NEC-SE-DS: Peligro Sísmico Diseño Sismo Resistente. Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC). Ecuador: MIDUVI.
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI) (2015b). NEC-SE-RE: Riesgo Sísmico, Evaluación, Rehabilitación de Estructuras. Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC). Ecuador: MIDUVI.
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI) (2015c). NEC-SE-GC: Geotecnia y Cimentaciones. Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC). Ecuador: MIDUVI.
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI) (2022). Manual de procedimiento administrativo y técnico para la evaluación de las edificaciones de propiedad del Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. Ecuador: MIDUVI.
- ONU-Hábitat, (2023). Rescuing SDG 11 for a Resilient Urban Planet: SDG11 Synthesis Report – High Level Political Forum 2023.
- Placencia, P., & Paredes, P., (2017). "Wire-Mesh and Mortar Confined Masonry As Seismic Resistant System for Houses Up To Two Stories", 16th World Conference on Earthquake, (2968), pp. 1–12, 2017

- Rubiños, A. C., Quiun, D. R., & Esparza, G. (2023). Adobe houses reinforced with welded wire mesh in Peru: 20 years of structural safety. En *14th North American Masonry Conference* (pp. 508–516). <https://www.researchgate.net/publication/371785710>
- Ruíz, J., & Alcocer, S. M. (1998). Desempeño experimental de estructuras de mampostería confinada rehabilitadas mediante el uso de la malla de alambre. *Revista de Ingeniería Sísmica*, (59), 59–79. <https://doi.org/10.18867/ris.59.222>
- Villar-Vega M, Silva V, Crowley H, et al. (2017) Development of a Fragility Model for the Residential Building Stock in South America. *Earthquake Spectra*. 33(2):581-604. doi:10.1193/010716EQS005M
- Zhong, J., Zhang, J., Zhi, X., & Fan, F. (2019). Probabilistic seismic demand and capacity models and fragility curves for reticulated structures under far-field ground motions. *Thin-Walled Structures*, 137, 436–447. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.01.032>