

José Luis Ordóñez-Fernández; Marco Antonio Tacuri-Rivas; Freddy Leonardo Espinoza-Urgiles; Hiroe Naomi Ordóñez-Barreto

<https://doi.org/10.35381/i.p.v8i15.5198>

Modos superiores de vibración y cortante basal dinámico de edificios irregulares sobre suelos medianamente rígidos

Higher-Order Vibration Modes and Dynamic Base Shear of Irregular Buildings on Moderately Rigid Soils

José Luis Ordóñez-Fernández

jlordonez@utmachala.edu.ec

Universidad Técnica de Machala, Machala, El Oro
Ecuador

<https://orcid.org/0000-0002-4314-1319>

Marco Antonio Tacuri-Rivas

mtacuri@utmachala.edu.ec

Universidad Técnica de Machala, Machala, El Oro
Ecuador

<https://orcid.org/0000-0002-7466-8076>

Freddy Leonardo Espinoza-Urgiles

fespinoza@utmachala.edu.ec

Universidad Técnica de Machala, Machala, El Oro
Ecuador

<https://orcid.org/0000-0002-0577-0448>

Hiroe Naomi Ordóñez-Barreto

hiroeorba@gmail.com

Unidad Educativa Juana de Dios, Machala, El Oro
Ecuador

<https://orcid.org/0009-0002-1746-1017>

Recibido: 02 de abril 2026

Revisado: 03 de mayo 2026

Aprobado: 15 de junio 2026

Publicado: 01 de julio 2026

José Luis Ordóñez-Fernández; Marco Antonio Tacuri-Rivas; Freddy Leonardo Espinoza-Urgiles; Hiroe Naomi Ordóñez-Barreto

RESUMEN

Este estudio tuvo como objetivo evaluar los modos superiores de vibración y cortante basal dinámico de edificios irregulares sobre suelos medianamente rígidos. Metodológicamente la investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo de modalidad documental y experimental; Se modelaron 21 estructuras tridimensionales de 4, 7 y 10 niveles, considerando siete tipos de irregularidades definidas por la norma de construcción vigente. Mediante análisis dinámico espectral y estático lineal, se determinaron los periodos de vibración, masas efectivas, factores de participación y cortantes basales. Los resultados demostraron que las edificaciones de 10 niveles presentan una influencia significativa de los modos superiores en todos los casos de edificios analizados, mientras que en las de 7 niveles esta influencia se manifiesta en la mitad de los modelos. En conclusión, la altura y el tipo de irregularidad son factores determinantes en la activación de modos superiores, recomendándose análisis no lineales dinámicos para edificaciones mayores a 7 niveles.

Descriptores: Mantenimiento de edificios; vibración; análisis cuantitativo; análisis de datos; análisis factorial. (Tesaurus UNESCO)

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the dominant vibration modes and dynamic base shear of irregular buildings on moderately stiff soils. Methodologically, the research was conducted using a quantitative approach that combined literature review and experimental methods. Twenty-one three-dimensional structures with 4, 7, and 10 stories were modeled, considering seven types of irregularities defined by the current building code. Using dynamic spectral and linear static analysis, the vibration periods, effective masses, participation factors, and base shear forces were determined. The results showed that 10-story buildings exhibit a significant influence of higher modes in all cases analyzed, whereas in 7-story buildings, this influence is evident in half of the models. In conclusion, height and the type of irregularity are determining factors in the activation of higher modes, and nonlinear dynamic analysis is recommended for buildings taller than 7 stories.

Descriptors: Building maintenance; vibration; quantitative analysis; data analysis; factor analysis. (UNESCO Thesaurus)

José Luis Ordóñez-Fernández; Marco Antonio Tacuri-Rivas; Freddy Leonardo Espinoza-Urgiles; Hiroe Naomi Ordóñez-Barreto

INTRODUCCIÓN

La configuración arquitectónica de las edificaciones modernas, impulsada por criterios estéticos y funcionales, ha derivado en una proliferación de estructuras que se apartan de la geometría regular. Sin embargo, la experiencia sísmica local reciente, como el terremoto de Pedernales en Ecuador (Mw 7.8) en 2016, ha demostrado que estas irregularidades son responsables de un comportamiento estructural deficiente y de una mayor propensión al colapso durante movimientos sísmicos severo (Ríos et al., 2026). Esta vulnerabilidad estructural se debe a la complejidad de su respuesta dinámica, que no puede ser capturada adecuadamente por métodos simplificados que asumen un comportamiento regular (Blasi et al., 2024). La necesidad de comprender y cuantificar esta respuesta ha motivado un creciente número de investigaciones en las últimas décadas, respaldadas también en que un edificio regular es más una idealización que una realidad, ya que la mayoría de los edificios construidos en zonas que van desde mediana a muy alta sismicidad evidencian distintas irregularidades que pueden ser consideradas como patologías de estructuración sísmica (Nady et al., 2022; Pachla et al., 2023). Estas se clasifican en irregularidades en planta y en elevación, aunque frecuentemente se presentan como una combinación de varios casos de irregularidad en planta o de varios casos de irregularidad en elevación e incluso como una mezcla de varios de ellos (Archana et al., 2020; Günaydin & Altunişik, 2022).

Estos efectos de las irregularidades en la respuesta sísmica estructural se amplifican debido a la mayor participación de los modos superiores de vibración en la respuesta global de las edificaciones. A diferencia de las estructuras regulares, donde el primer modo suele ser dominante, en los sistemas aporricados irregulares los modos superiores pueden contribuir de manera sustancial, modificando la distribución de fuerzas sísmicas. La distribución del cortante de piso en estructuras regulares sigue un patrón dominado por el primer modo, mientras que en las irregulares puede depender en gran medida de

José Luis Ordóñez-Fernández; Marco Antonio Tacuri-Rivas; Freddy Leonardo Espinoza-Urgiles; Hiroe Naomi Ordóñez-Barreto

los modos superiores, aumentando la demanda de cortante, desplazamientos laterales y consecuentemente las derivas (Blasi et al., 2024).

En este contexto, el presente estudio se centra en el análisis del cortante basal dinámico de edificios irregulares considerando perfiles de suelo de rigidez media como el tipo D presentes en varias ciudades del Ecuador, con un énfasis particular en la influencia de los modos superiores de vibración. Para lograr este propósito, se plantea un estudio que parte de un análisis modal detallado de edificios con diversas configuraciones irregulares representativas del parque constructivo ecuatoriano. La metodología incluye la realización, para cada edificio aporricado de concreto armado de diferentes niveles, de un análisis modal y de análisis dinámicos lineales utilizando el espectro de diseño de la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC). Un aspecto clave del análisis será la cuantificación de la participación modal de la masa, para identificar qué modos son predominantes en cada tipo de irregularidad y cómo esta participación se correlaciona con el cortante basal y su distribución.

Esta investigación se fundamenta en la premisa de que las normativas sísmicas basadas en métodos de fuerza equivalente o en espectros de respuesta que asumen un comportamiento predominantemente del primer modo, pueden no ser completamente adecuadas para el diseño seguro de edificios irregulares. La contribución de los modos superiores en estas estructuras genera demandas por sismo de diseño que no son proporcionales a las obtenidas para estructuras regulares, donde los coeficientes de penalización por irregularidad, aun siendo necesarios, podrían ser insuficientes para cubrir este incremento de demanda en todas las posibles configuraciones (Chopra & Goel, 2023). Así, luego de realizar una revisión crítica de la literatura existente sobre el comportamiento sísmico de edificios irregulares y sus parámetros más relevantes para su caracterización (Günaydin & Altunişik, 2022), se procedió al cálculo, modelación numérica y análisis de 21 casos de estudio cuyos resultados permiten discutir la pertinencia de los procedimientos de diseño actuales y, eventualmente, proponer

José Luis Ordóñez-Fernández; Marco Antonio Tacuri-Rivas; Freddy Leonardo Espinoza-Urgiles; Hiroe Naomi Ordóñez-Barreto

recomendaciones para una estimación más precisa del cortante basal en edificios irregulares, considerando explícitamente los efectos de los modos superiores.

MÉTODO

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo de modalidad documental y experimental. El componente documental consistió en una investigación bibliográfica para la recolección de datos necesarios para el estudio: metodología del diseño sismo resistente de estructuras dúctiles, geología y geotecnia local, peligro sísmico y factor de zona sísmica Z , tipos de irregularidades en planta y elevación, coeficientes de configuración estructural, cargas gravitacionales y cargas laterales de diseño por sismo. El componente experimental se fundamentó en la modelación de 21 sistemas estructurales dúctiles tipo pórticos espaciales, donde mediante cálculos manuales y computacionales se obtuvo la respuesta estructural requerida.

El tipo de investigación se clasificó en tres categorías:

Aplicada: mediante una investigación de las construcciones tipo, definiendo las características y propiedades necesarias para el prediseño estructural, tales como secciones de los elementos principales que forman los pórticos a través del estudio de códigos de diseño e irregularidades correspondientes a las normativas.

Experimental: se realizó a partir de la información recopilada, modificando las secciones de los elementos de las diferentes estructuras para aplicar intencionalmente en cada una de ellas, un ajuste de cortante basal según lo menciona la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC).

Descriptiva: con la información recopilada y el modelado de las estructuras, se procedió a realizar el análisis estático y dinámico espectral para conocer el comportamiento de las edificaciones. Posteriormente, mediante la investigación descriptiva se analizaron los resultados obtenidos para determinar la influencia de los modos superiores en los

José Luis Ordóñez-Fernández; Marco Antonio Tacuri-Rivas; Freddy Leonardo Espinoza-Urgiles; Hiroe Naomi Ordóñez-Barreto

sistemas estructurales reticulares con irregularidades y para las diferentes alturas (Oyguc, 2022).

Las variables de investigación consideradas en el estudio fueron:

Variable independiente: altura de la edificación (4, 7 y 10 niveles) y tipo de irregularidad estructural (siete configuraciones definidas por la NEC).

Variable dependiente: influencia de los modos superiores de vibración, expresada mediante la relación entre las fuerzas de acciones en la base de los modos superiores y la fuerza del primer modo.

El procedimiento metodológico se desarrolló en cinco etapas, donde el método de Diseño Basado en Fuerzas DBF es la referencia principal para la caracterización de datos y resultados en la determinación de las fuerzas sísmicas laterales (Cortante Basal de Diseño) según se presenta en el siguiente esquema básico:

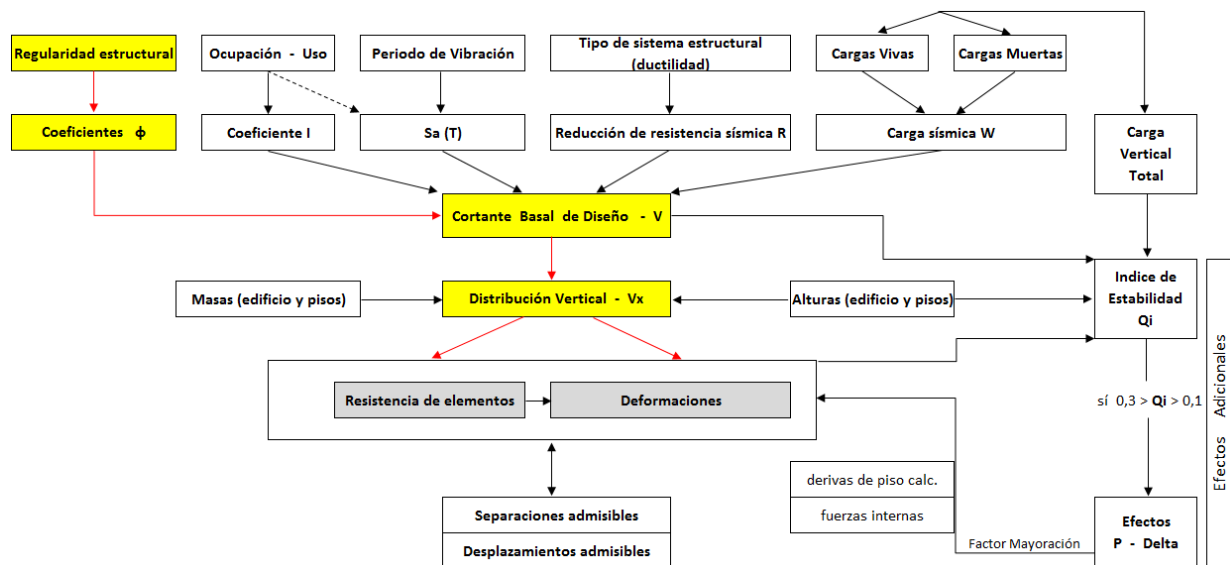


Figura 1. Flujo de Diseño Basado en Fuerzas.
Elaboración: Los autores.

José Luis Ordóñez-Fernández; Marco Antonio Tacuri-Rivas; Freddy Leonardo Espinoza-Urgiles; Hiroe Naomi Ordóñez-Barreto

Etapla 1: Definición de parámetros y prediseño.

Se establecieron las características de los modelos estructurales:

Sistema estructural aporticado resistente a momento de hormigón armado.

Resistencia a la compresión simple del hormigón: $f_c = 28 \text{ MPa}$

Módulo de elasticidad del concreto: $E_c = 23393 \text{ MPa}$

Peso volumétrico del concreto: $\gamma_c = 24 \text{ kN/m}^3$

Columnas con inercia agrietada del 80% de la inercia gruesa ($0.8 I_g$).

Vigas con inercia agrietada del 50% de la inercia gruesa ($0.5 I_g$).

Límite de fluencia del acero de refuerzo: $f_y = 420 \text{ MPa}$

Módulo de elasticidad del acero de refuerzo: $E_s = 204000 \text{ MPa}$

Se definieron las secciones de los elementos estructurales cumpliendo los criterios de diseño propuestos por la norma ACI 318 según se presenta en la Tabla 1 y se estableció una losa bidireccional alivianada de 25 cm de altura para todos los edificios.

Tabla 1.

Secciones transversales de los elementos estructurales.

Niveles	Columnas (cm)	Vigas (cm)
10	90 x 90	30 x 65
7	70 x 70	30 x 65
4	50 x 50	30 x 65

Elaboración: Los autores.

Etapla 2: Modelación tridimensional.

Se idealizaron modelos tridimensionales de edificios de varios niveles con irregularidades, mediante softwares de dibujo técnico y de análisis estructural se ajustaron detalles geométricos en planta como distribución de vanos, columnas, distancias entre ejes, numero de pórticos en ambas direcciones y en elevación se verifico el número de pisos, alturas de entrepiso, continuidad de ejes de columna y estructuración de pórticos para resistencia de cargas gravitacionales y laterales (Nady et al., 2022). Las

José Luis Ordóñez-Fernández; Marco Antonio Tacuri-Rivas; Freddy Leonardo Espinoza-Urgiles; Hiroe Naomi Ordóñez-Barreto

irregularidades modeladas y analizadas están consideradas en el capítulo de Peligro Sísmico – Diseño Sismo Resistente de la Norma Ecuatoriana de la Construcción, específicamente en la sección 5 referente a “Consideraciones para el pre-diseño y diseño conceptual”. Estas son: Ejes estructurales no paralelos (EJ), Retrocesos excesivos en las esquinas (RET), Discontinuidades en el sistema de piso (DP1 y DP2), Irregularidad Geométrica (GEO), Distribución de masa (DM) y Rigidez lateral variable - Piso flexible (RIG). En estos seis tipos de irregularidad se planteó en cada uno edificios de 10, 7 y 4 pisos con alturas de entrepiso de 3,2 m para todos los niveles básicamente (Tamizharasi & Murty, 2022).

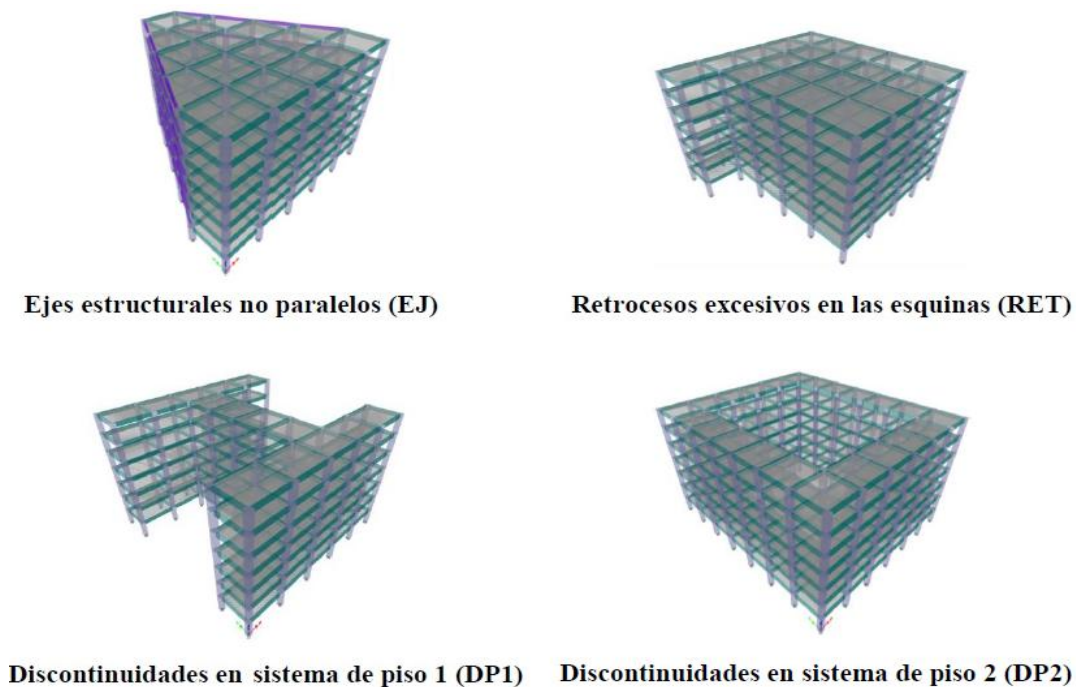


Figura 2. Irregularidades en planta.
Elaboración: Los autores.

José Luis Ordóñez-Fernández; Marco Antonio Tacuri-Rivas; Freddy Leonardo Espinoza-Urgiles; Hiroe Naomi Ordóñez-Barreto

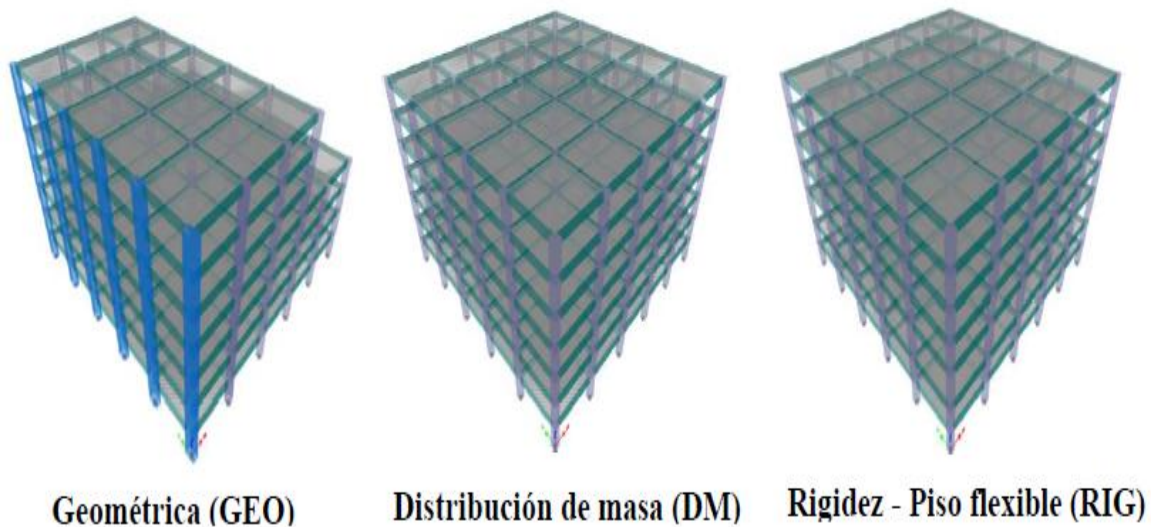


Figura 3. Irregularidades en elevación.

Elaboración: Los autores.

Etap 3: Definición de cargas.

Las cargas gravitacionales del tipo Muerta y Viva deben ser previamente estimadas y están relacionadas con el uso o funcionalidad del edificio, en esta investigación se unifico este criterio y para los 21 edificios se consideró todos destinados a “Oficinas”. Se agrupó por tipos de irregularidad para la asignación de cargas y en la carga muerta se incluye el peso propio de la losa alivianada de hormigón.

Tabla 2.

Definición de cargas gravitacionales.

Grupo A: Irregularidad de ejes no paralelos, retrocesos excesivo en esquina, irregularidad geométrica y rigidez lateral – piso flexible		
Edificios aporticados de 10, 7 y 4 niveles		
Niveles	Carga Muerta (kN/m ²)	Carga Viva (kN/m ²)
Entrepisos	5,80	2,40
Azotea	3,10	1,25

José Luis Ordóñez-Fernández; Marco Antonio Tacuri-Rivas; Freddy Leonardo Espinoza-Urgiles; Hiroe Naomi Ordóñez-Barreto

Grupo B: Irregularidad por discontinuidad del sistema de piso		
Edificios aporticados de 10, 7 y 4 niveles		
Niveles	Carga Muerta (kN/m ²)	Carga Viva (kN/m ²)
Entrepisos	4,80	2,30
Azotea	2,40	1,2
Grupo C: Irregularidad de distribución de masa		
Edificios aporticados de 10, 7 y 4 niveles		
Niveles	Carga Muerta (kN/m ²)	Carga Viva (kN/m ²)
Entrepisos	5,80	2,00
Nivel de mayor masa	10,00	4,85
Azotea	3,10	1,25

Elaboración: Los autores.

Para la carga sísmica, los edificios a ser utilizados como oficinas particulares básicamente se ubican en una categoría de ocupación normal y con respecto a ellos la filosofía de diseño sismo resistente establece que para la ocurrencia de un sismo severo se garantice la seguridad de la vida evitando el colapso de la estructura aun cuando la misma presente daños estructurales y no estructurales. Así entonces, la estructura aporticada según la norma de construcción vigente, es diseñada para resistir las fuerzas o cortante basal, controlar derivas de piso y disipar energía con mecanismos inelásticos dúctiles (Vielma-Quintero et al., 2024).

El cálculo de las fuerzas laterales se rige por procedimientos estáticos y dinámicos elegidos fundamentalmente por la configuración estructural en elevación y en planta del edificio que los separa en estructuras regulares y estructuras irregulares. Finalmente, para la definición de las fuerzas sísmicas horizontales se utilizó:

$$V = \frac{I \cdot S_a}{R \cdot \phi_P \cdot \phi_E} W \quad [1]$$

$$W = D + 0,25 L \quad [2]$$

De donde,

V = Cortante basal total de diseño.

W = Carga sísmica reactiva

José Luis Ordóñez-Fernández; Marco Antonio Tacuri-Rivas; Freddy Leonardo Espinoza-Urgiles; Hiroe Naomi Ordóñez-Barreto

D = Carga Muerta (obtenida desde la tabla 2)

L = Carga Viva (obtenida desde la tabla 2)

I = Coeficiente de Importancia = 1,0

R = Factor de reducción de resistencia sísmica= 8 (sistemas estructurales dúctiles)

ϕ_P = Coeficiente de configuración = 0,9 (para edificios con irregularidad en planta)

ϕ_P = Coeficiente de configuración = 1,0 (para edificios con irregularidad en elevación)

ϕ_E = Coeficiente de configuración = 1,0 (para edificios con irregularidad en planta)

ϕ_E = Coeficiente de configuración = 0.9 (para edificios con irregularidad en elevación)

Para cada edificio se aplica un análisis direccional y se asume que los cortantes basales de diseño no actúan de manera concurrente en la dirección de cada eje principal "X" y "Y" de la estructura.

Etapla 4: Análisis estructural.

Se aplicaron tres métodos de análisis:

a) Análisis modal. – Considerando la ecuación [3] de equilibrio dinámico, se determinó la matriz de rigidez $[K]$ y matriz de inercia $[m]$ de los edificios. Seguidamente mediante la resolución del problema de valores propios definido por la ecuación [4], se obtuvo la matriz de frecuencias al cuadrado $[\omega^2]$ con la que se identificó los periodos de vibración y sus respectivos modos naturales de vibración de los 21 sistemas de varios grados de libertad (Chopra, 2017).

José Luis Ordóñez-Fernández; Marco Antonio Tacuri-Rivas; Freddy Leonardo Espinoza-Urgiles; Hiroe Naomi Ordóñez-Barreto

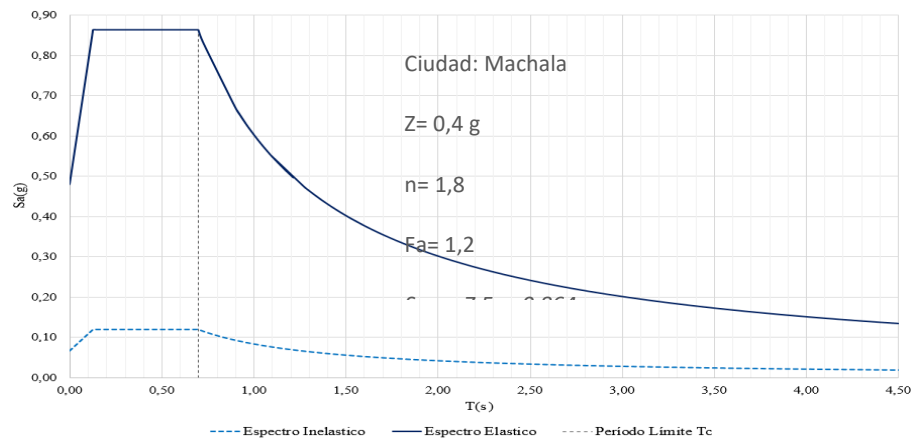


Figura 4. Espectros de Diseño en Aceleraciones (Elástico e Inelástico)
Elaboración: Los autores.

$$[m] \cdot \{\ddot{q}\} + [K] \cdot \{q\} = \{0\} \quad [3]$$

$$[K] - \omega^2 [m] \cdot \{\emptyset\} = 0 \quad [4]$$

b) Análisis sísmico estático. - Para cada estructura aporticada se determinó el cortante basal de diseño mediante la ecuación [1] considerando que el periodo de vibración de las estructuras obtenido por el método de análisis modal no supere en más del 30% el periodo determinado por la ecuación [5] (ASCE/SEI 41-23, 2023).

$$T = C_t \cdot h_n^\alpha \quad [5]$$

C_t = Coeficiente por tipo de edificio= 0,055

α = Coeficiente por tipo de edificio= 0,9

h_n = altura máxima del edificio en metros

c) Análisis dinámico espectral. - Desde el espectro de diseño en aceleraciones para la ciudad de Machala presentado en la Figura 4, se obtienen los valores de aceleración “Sa” para cada modo de vibración obtenido en el análisis modal. Con el porcentaje de participación de masa efectiva respectivo se determina el cortante basal del modo

José Luis Ordóñez-Fernández; Marco Antonio Tacuri-Rivas; Freddy Leonardo Espinoza-Urgiles; Hiroe Naomi Ordóñez-Barreto

analizado, que luego mediante un método estadístico de combinación modal (SRSS o CQC) permitido en ingeniería sísmica, se calcula la respuesta máxima total como el cortante basal del edificio en esa dirección (Manjula et al., 2016).

Etapas 5: Verificación de resultados.

Inicialmente, los resultados obtenidos respaldan la disposición inicial de que los siete casos de irregularidad incurran en la aplicación de ajuste de cortante al verificarse que el cortante dinámico es menor al 85% del cortante estático en cada estructura analizada (ASCE/SEI 41-23, 2023).

Se identifica el porcentaje de participación de masa efectiva para el primer modo de vibración como un indicador relevante en la definición de irregularidad estructural y también para estimar la necesidad del aporte de los modos superiores de vibración para acumular al menos el 90% de la masa sísmica reactiva total estudiada individualmente por cada dirección horizontal del edificio (Chen et al., 2026).

Se combinan los parámetros generalizados del análisis modal aplicado a los edificios, encontrando una relación entre los factores de participación y el porcentaje de masas efectivas de cada modo de vibración destacando diferencias entre el modo fundamental y los modos superiores disponibles en el sistema masa resorte de varios grados de libertad.

Al final de los tres análisis lineales efectuados en esta investigación a los edificios aporticados, se dispone de cortantes estáticos, cortantes dinámicos, factores de ajuste de cortante, que son relacionados para validar el efecto de los modos superiores en las fuerzas de diseño por sismo severo para los suelos tipo D en la ciudad de Machala.

En el inicio del proceso de diseño de cada estructuración sísmica, se verificó el control de derivas inelásticas mediante el análisis dinámico espectral evitando valores cercanos al 2% en cada dirección. Estas derivas de piso inelásticas son inferiores a las admisibles,

José Luis Ordóñez-Fernández; Marco Antonio Tacuri-Rivas; Freddy Leonardo Espinoza-Urgiles; Hiroe Naomi Ordóñez-Barreto

pero no se aplicó ningún criterio de optimización en este requisito de diseño sismo resistente establecido en la NEC (Blasi et al., 2024).

Para esta etapa de verificación de resultados, los métodos estadísticos aplicados fueron: cálculo de porcentajes, análisis comparativo, análisis de tendencias y análisis de correlación.

RESULTADOS

Para asimilar estructuralmente desde las propiedades dinámicas de los diferentes edificios analizados, se presenta en la gráfica de espectros de diseño en aceleraciones la franja de resultados de periodos fundamentales de vibración obtenidos como resultado del análisis modal de todos los edificios, allí se observa que para un edificio de cuatro niveles se obtuvo un mínimo de 0,5 s y para un edificio de 10 niveles el periodo fundamental de vibración máximo alcanzado fue de 1,63 s. En consecuencia, los coeficientes sísmicos para el cálculo del cortante basal se ubican entre el 5,2 % al 12%. En el análisis modal se determinó los diferentes porcentajes de masas efectivas que participan en cada modo de vibración, considerando los distintos tipos de irregularidad en planta y elevación estudiados, se extrae y presenta mediante la Figura 6 la cantidad de masa que se activa o se mueve en el primer modo de vibración para cada edificio en sus direcciones ortogonales de análisis (X, Y).

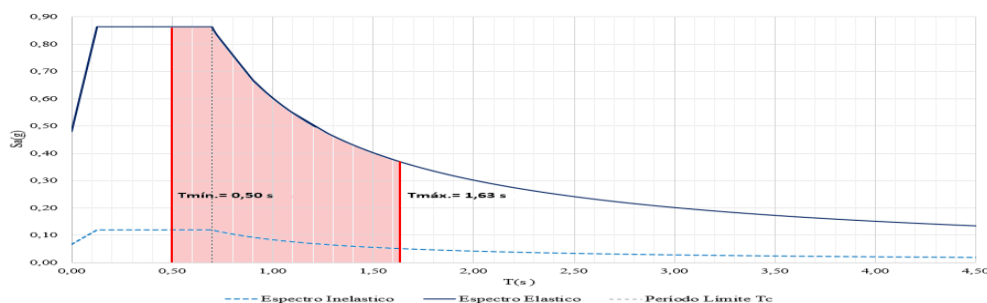


Figura 5. Franja de resultados de periodos fundamentales de vibración.
Elaboración: Los autores.

José Luis Ordóñez-Fernández; Marco Antonio Tacuri-Rivas; Freddy Leonardo Espinoza-Urgiles; Hiroe Naomi Ordóñez-Barreto

En el análisis modal se determinó los diferentes porcentajes de masas efectivas que participan en cada modo de vibración, considerando los distintos tipos de irregularidad en planta y elevación estudiados, se extrae y presenta mediante la Figura 6 la cantidad de masa que se activa o se mueve en el primer modo de vibración para cada edificio en sus direcciones ortogonales de análisis (X,Y).

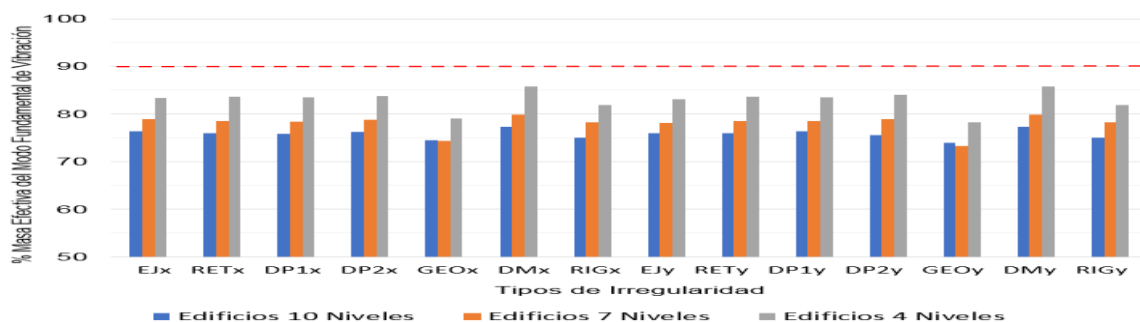


Figura 6. Porcentaje de masas efectivas del modo fundamental de vibración.
Elaboración: Los autores.

Al unificar en un solo gráfico como el presentado en la Figura 7, parámetros de respuesta modal como el factor de participación y el porcentaje de masa efectiva normalizado se puede establecer una relación directa entre ellos basada en la influencia de modos de vibración diferentes al fundamental (Blasi et al., 2024).

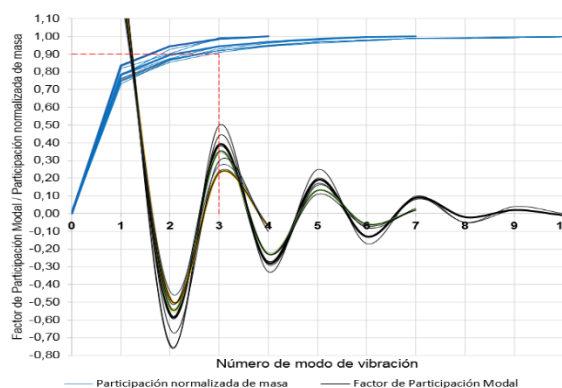


Figura 7. Factor de participación y porcentaje de masa efectiva normalizado.
Elaboración: Los autores.

José Luis Ordóñez-Fernández; Marco Antonio Tacuri-Rivas; Freddy Leonardo Espinoza-Urgiles; Hiroe Naomi Ordóñez-Barreto

Luego de aplicar la combinación de los cortantes dinámicos obtenidos por cada modo en una misma dirección de estudio y obtener el cortante basal de diseño, se calculó los porcentajes de ajuste exigidos en los requisitos sismo resistentes de la Norma Ecuatoriana de la Construcción. Se correlaciono esos resultados con el porcentaje de masa activada en el modo fundamental de vibración y se generó una tendencia no lineal básica preliminar donde la presencia del exponente negativo distinto de 1 manifiesta que la tasa de cambio entre las variables no es constante (Chopra & Goel, 2002).

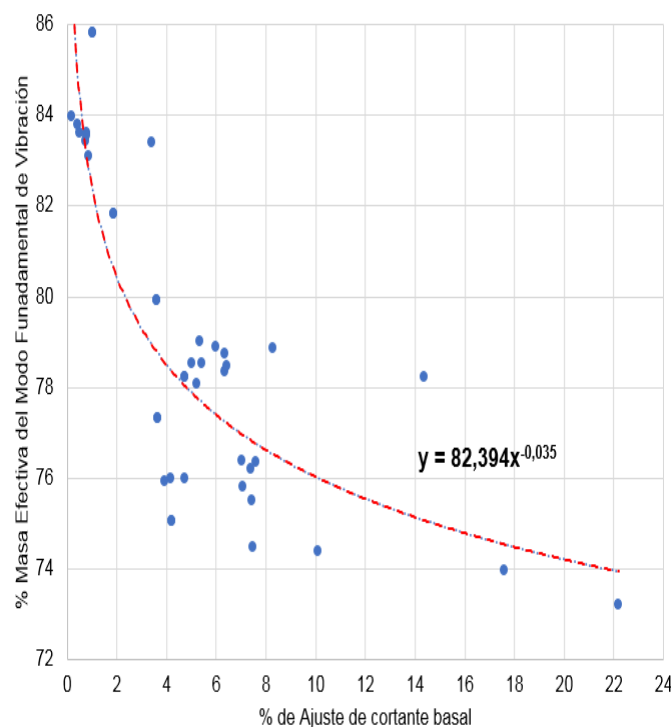


Figura 8. Porcentaje de ajuste de cortante basal para alcanzar el 85 % normativo.
Elaboración: Los autores.

A nivel internacional, rige un estándar técnico de procedencia estadounidense creado para la **evaluación sísmica y la rehabilitación o reforzamiento de edificios existentes** denominado **ASCE/SEI 41**. Esta norma establece métodos analíticos y criterios de desempeño basados en ingeniería estructural, en la cual, uno de los indicadores que

José Luis Ordóñez-Fernández; Marco Antonio Tacuri-Rivas; Freddy Leonardo Espinoza-Urgiles; Hiroe Naomi Ordóñez-Barreto

permite elegir entre distintos métodos no lineales de evaluación sísmica tiene relación con la influencia de los cortantes generados por los modos superiores vs el cortante del primer modo (ASCE/SEI 41-23, 2023). En la Figura 9 se observa este cociente de cortantes para cada edificio estudiado de 4,7 y 10 pisos.

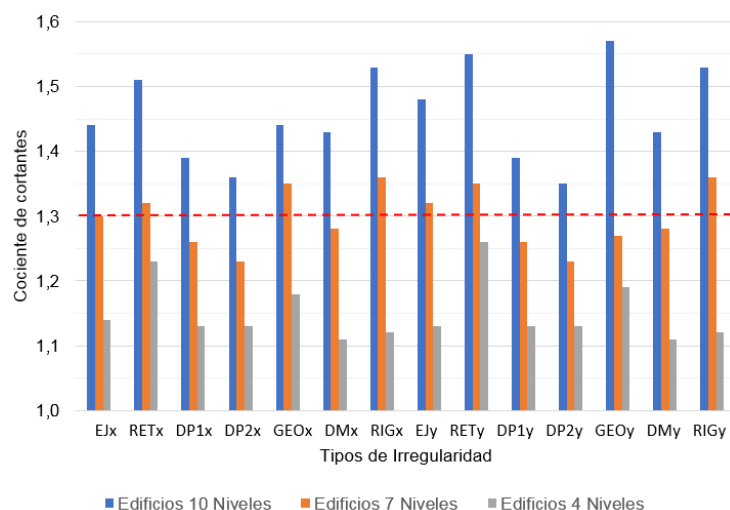


Figura 9. Cociente entre cortantes dinámicos de modos superiores y modo fundamental.
Elaboración: Los autores.

DISCUSION

Los resultados obtenidos permiten identificar el nivel de demanda sísmica al que están sometidos los edificios analizados entre 4 y 10 niveles, para un suelo de mediana rigidez como los es el tipo “D”, el 76% de las estructuras ubican su periodo fundamental de vibración fuera de la zona de máximas aceleraciones espectrales (mayor que el periodo limite T_c). En cambio, para otro tipo de suelo como aquellos muy blandos con velocidades de ondas de corte menores a 180 m/s la franja de periodos fundamentales mayormente se ubicaría en la meseta de aceleraciones horizontales de diseño modificando los cortantes basales dinámicos en cada dirección (Mouhine & Hilali 2022).

Al presentar, todos los edificios algún tipo de irregularidad comprobada, se identifica que ninguna de las 21 estructuras consigue una participación de masa con respecto a la masa

José Luis Ordóñez-Fernández; Marco Antonio Tacuri-Rivas; Freddy Leonardo Espinoza-Urgiles; Hiroe Naomi Ordóñez-Barreto

sísmica total que alcance el 90% en el primer modo de vibración, generando así una dependencia del aporte de los modos superiores para el cálculo de las fuerzas sísmicas (Chen et al., 2026; Pachla et al., 2023).

La participación de masa sísmica mínima para el cálculo de fuerzas laterales, desplazamientos, derivas y acciones en elementos estructurales se alcanzó con la colaboración de otros modos distintos al fundamental (modos superiores). Todos los 21 edificios irregulares necesitaron de ellos, estos modos superiores cuentan con factores de participación altos incluso superando el 30% para los modos # 2, # 3 y # 4 (Tamizharasi & Murty, 2022; Günaydin & Altunişik, 2022). Así, los edificios de 7 y 10 pisos o niveles deben contemplar en el análisis dinámico espectral de al menos los tres primeros modos de vibración en cada eje horizontal principal.

Para un rango de participación de masa en el primer modo de vibración comprendido entre el 73% al 86% del total, se verifica que existe una distancia entre la magnitud del cortante dinámico y el cortante estático que se acentúa cuando la participación referida está en el límite inferior del rango identificado en este estudio. Para cumplir con la norma de construcción se aplica un factor de ajuste o mayoración que puede alcanzar hasta el 22%.

Según la sección 7.3.2.1 de la ASCE41 17, los efectos de los modos superiores de vibración se considerarán significativos si el cortante en cualquier piso, resultante del análisis modal considerando los modos requeridos para obtener el 90% de participación de masa, excede el 130% del cortante de piso correspondiente considerando únicamente la respuesta del primer modo fundamental (ASCE/SEI 41-23, 2023). Para las estructuras en análisis se determinó que esto se cumple en los edificios de 7 niveles o más, pero con énfasis en las construcciones de mayor altura que padecen de las irregularidades de ejes estructurales no paralelos, retrocesos excesivos en las esquinas, elevación geométrica y diferencias en la rigidez lateral de entrepiso que ocasiona pisos flexibles (Oyguc, 2022; Al Agha & Umamaheswari, 2022).

José Luis Ordóñez-Fernández; Marco Antonio Tacuri-Rivas; Freddy Leonardo Espinoza-Urgiles; Hiroe Naomi Ordóñez-Barreto

CONCLUSIONES

Se determina que, cuando la participación de masa del primer modo se encuentra por debajo del 80% con presencia de irregularidad estructural, existe una diferencia significativa entre el cortante dinámico y el estático, lo que exige aplicar factores de ajuste mayores al 20 % para cumplir con el mínimo normativo del 85% de relación entre ellos. Esta conclusión evidencia que la omisión de los modos superiores conduce a diseños poco conservadores, especialmente en edificios de mediana y gran altura ubicados en suelos de rigidez media presentes en el Ecuador.

Se confirma que, para edificios de 7 o más niveles con irregularidades específicas (ejes no paralelos, retrocesos excesivos, irregularidad geométrica y pisos flexibles), el cociente entre el cortante generado por modos superiores y el del primer modo supera el 130%, umbral establecido por la norma ASCE/SEI 41 para considerar efectos significativos. En este tipo de edificios, los métodos estáticos no lineales basados únicamente en el primer modo de vibración subestiman la demanda sísmica en estructuras con estas tipologías de irregularidades.

A partir de los resultados, se concluye que las normativas sísmicas actuales, basadas en métodos de fuerza equivalente o espectros de respuesta que asumen predominancia del primer modo, resultan insuficientes para edificios irregulares de más de 7 niveles. Se recomienda incorporar explícitamente la contribución de los modos superiores en el cálculo del cortante basal y, cuando corresponda, realizar análisis dinámicos no lineales para garantizar un diseño seguro y resiliente ante sismos severos.

Dado que la investigación actual se fundamenta en análisis lineales y concluye que los edificios de 7 niveles o más presentan una influencia significativa de modos superiores, se recomienda que futuros estudios apliquen **análisis dinámicos no lineales paso a paso (time-history)** utilizando registros de acelerogramas reales ajustados al espectro de la ciudad de Machala, aplicando a su vez un estudio paramétrico con variación de

José Luis Ordóñez-Fernández; Marco Antonio Tacuri-Rivas; Freddy Leonardo Espinoza-Urgiles; Hiroe Naomi Ordóñez-Barreto

tipología de suelo, sistemas estructurales y combinación de irregularidades controlando en cada caso demandas inelásticas locales.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen conflicto de interés en la publicación de este artículo.

FINANCIAMIENTO

No monetario.

AGRADECIMIENTO

A todos los actores sociales involucrados en el desarrollo de la investigación.

REFERENCIAS CONSULTADAS

- Al Agha, W., & Umamaheswari, N. (2022). Seismic response of irregular RC buildings designed for gravity and seismic loads. *Bulletin of Earthquake Engineering*, *22*, 5231–5257. <https://doi.org/10.1007/s10518-024-01971-4>
- Archana, J., Jayalekshmi, B., Venkataramana, K. (2020). Effect of in-plan eccentricity on vertically stiffness irregular buildings under earthquake loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 137. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106251>
- ASCE/SEI 41-23. (2023). Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings. American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784415856>
- Blasi, G., Scarlino, A. S., Chirivì, S., Perrone, D., & Aiello, M. A. (2024). Seismic response of irregular RC buildings designed for gravity and seismic loads. *Bulletin of Earthquake Engineering*, *22*(10), 5231–5257. <https://doi.org/10.1007/s10518-024-01971-4>
- Chen, W., Yu, D., Li, G. (2026). An efficient regional seismic response analysis method considering building irregularity. *Structures* 87. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2026.111479>

José Luis Ordóñez-Fernández; Marco Antonio Tacuri-Rivas; Freddy Leonardo Espinoza-Urgiles; Hiroe Naomi Ordóñez-Barreto

- Chopra, A. K. (2017). Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering (5th ed.). Pearson. <https://n9.cl/wj8n20>
- Chopra, A. K., & Goel, R. K. (2002). A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, *31*(3), 561-582. <https://doi.org/10.1002/eqe.144>
- Chopra, A. K., & Goel, R. K. (2023). Evaluation of higher mode effects in seismic design of irregular buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. <https://n9.cl/wj8n20>
- Günaydin, M., & Altunişik, A. C. (2022). Seismic performance evaluation of irregular RC buildings with different irregularities. *Structures*, *41*, 159-172. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.05.012>
- Khosravi, A., & Tehrani, P. (2024). Investigating the effect of earthquake incident angle on seismic response and fragility analysis of irregular RC buildings with nonparallel systems. *Structures* 68. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107135>
- Manjula, N. K., Nagarajan, P., Pillai, T. M. M., & Karthiga, S. (2016). On the relevance of nonlinear static procedures for buildings with vertically asymmetric setbacks. *Journal of Structural Engineering*. <https://doi.org/10.1177/1369433216630826>
- Mouhine, M., & Hilali, E. (2022). Seismic vulnerability for irregular reinforced concrete buildings with consideration of site effects. *Materials Today: Proceedings*, *58*, 1039-1043. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.038>
- Nady, O., Mahfouz, S. Y., & Taher, S. E. D. F. (2022). Quantification of Vertical Irregularities for Earthquake Resistant Reinforced Concrete Buildings. *Buildings*, *12*(8), 1160. <https://doi.org/10.3390/buildings12081160>
- Oyguc, R. A. (2022). A case study on an innovative seismic performance evaluation procedure for irregular RC buildings. *Frontiers in Built Environment*, *8*. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.1058983>
- Pachla, F., Tatara, T., & Aldabbik, W. (2023). Impact of Various High Intensity Earthquake Characteristics on the Inelastic Seismic Response of Irregular Medium-Rise Buildings. *Applied Sciences*, *14*(21), 9740. <https://doi.org/10.3390/app14219740>

José Luis Ordóñez-Fernández; Marco Antonio Tacuri-Rivas; Freddy Leonardo Espinoza-Urgiles; Hiroe Naomi Ordóñez-Barreto

Rios, A., et al. (2026). Beyond Prescriptive Codes: A Validated Linear–Static Methodology for Seismic Design of Soft-Storey RC Structures. *Buildings* 2026, 16, 60. <https://doi.org/10.3390/buildings16010060>

Tamizharasi, G., & Murty, C. V. R. (2022). Seismic performance of torsionally irregular multistorey RC buildings with optimised shear wall configurations. *Earthquakes and Structures*, *23*(3), 283. <https://doi.org/10.12989/eas.2022.23.3.283>

Vielma-Quintero, J. C., Diaz-Segura, E. G., & Vielma, J. C. (2024). Influence of the Plan Structural Symmetry on the Non-Linear Seismic Response of Framed Reinforced Concrete Buildings. *Symmetry*, *16*(3), 370. <https://doi.org/10.3390/sym16030370>

©2026 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)