



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Caracterización de modelos estructurales mediante simulación de sismos de Ibagué en mesa sísmica

Pablo Arturo Jiménez Puentes

Universidad Nacional de Colombia
Facultad, Departamento de Ingeniería Civil
Manizales, Colombia

2023

Caracterización de modelos estructurales mediante simulación de sismos de Ibagué en mesa sísmica

Pablo Arturo Jiménez Puentes

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito para optar al título de:
Magister en Ingeniería - Estructuras

Director:

Ph.D. Daniel Alveiro Bedoya Ruiz

Codirector:

M.Sc. Juan Pablo Herrera Castaño

Línea de Investigación:

Sísmica y sismología

Grupo de Investigación:

Ingeniería Sísmica y Sismología

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Departamento de Ingeniería Civil
Manizales, Colombia

2023

Dedicatoria

Quiero dedicar todo el esfuerzo invertido en este trabajo a *mi madre Nancy Puentes quien me enseñó que todo lo propuesto se debe cumplir y siempre hacerlo con humildad y que a pesar de que siempre se comenten errores siempre debemos aprender a levantarnos y encontrar la forma de ser mejores, también agradezco a mi Tía Fanny Cruz por siempre apoyarme, estar presente en mi formación. que las cosas siempre se deben hacer de la mano de Dios, también agradezco a mi mejor amigo Juan Guillermo que formo parte fundamental de todo este proceso y que de una u otra manera siempre estuvo para apoyarme.*

Declaración de obra original

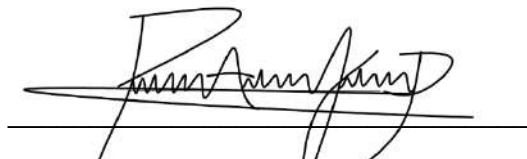
Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Pablo Arturo Jiménez Puentes', is written over a horizontal line.

Pablo Arturo Jiménez Puentes

Fecha 30/01/2023

Fecha

Agradecimientos

Expreso mis más sinceros agradecimientos a mi director de tesis el PhD. Daniel Alveiro Bedoya Ruiz quien me acompañó en el proceso académico y guía de la formulación y realización de esta tesis. También agradezco a mi codirector Ing. Juan Pablo Herrera por su apoyo. Mis agradecimientos también a el Ing. Edwin Alexander Urbano Guerrero de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales y a los laboratoristas Wilson Cardona Henao Quintero y Juan David Cardona Quintero de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales y también al ingeniero Néstor Guerrero de la Universidad de Ibagué y al ingeniero Juan Carlos Zorrilla quienes apoyan constantemente las dinámicas de formación, investigación y construcción. Por último, a dos personas importantes en mi formación profesional el Ing. Juan David del Rio Gaitán y el Ing. Carlos Ariel Naranjo Torres quienes siempre confiaron y me brindaron la oportunidad de aplicar mis capacidades para afrontar los retos que se me presentan a nivel de la ingeniería estructural, a ellos les debo gran parte de mis logros, hasta el día de hoy siempre estaré agradecido de haber tenido en mi camino personas como ustedes. Finalmente, quiero agradecer al Laboratorio de Estructuras de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, donde se desarrollaron todos los ensayos experimentales sobre los modelos estructurales.

Resumen

Caracterización de modelos estructurales mediante simulación de sismos de Ibagué en mesa sísmica

En el siguiente trabajo de investigación se aplican métodos analíticos y experimentales, con el objetivo de comprender la relación que existe entre las características dinámicas de un conjunto de edificios reales y la construcción de modelos estructurales que tratan de representarlos mediante la caracterización de sus propiedades dinámicas tal como su periodo natural de vibración, partiendo de un conjunto de registros de aceleración que imprimen un empuje lateral considerando los sismos de la ciudad de Ibagué (Tolima) y su localización así como de otras regiones sísmicamente activas, para obtener una respuesta mediante un entorno simulado en mesas sísmica que permita entender la estructura implementada en cada uno de los edificios con diferentes tipos de uso definidos en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente, NSR-10. La investigación se soporta en la obtención e identificación de una base de datos de registros a partir de la microzonificación de Ibagué y sismos ocurridos recientes por un período de tiempo determinado. Es así como se identifican las zonas de la ciudad que refieren algún tipo de amenaza probable, respecto a las variables sísmicas y su comportamiento con datos de diseño real, cumpliendo lineamientos normativos vigentes, dada su relación de diseño real respecto a los modelos estructurales que los representan mediante la caracterización de su comportamiento dinámico. A partir del análisis aproximado como resultado de la simulación en mesa sísmica que puede tener una estructura, con configuraciones arquitectónicas y estructurales probables, como lo son las encontradas en la ciudad de Ibagué, con la finalidad de disminuir el riesgo sísmico y propender por el diseño de estructuras resilientes a terremotos.

Palabras clave: Caracterización, Sismicidad, Modelo Estructural, Mesa Sísmica, Estructura, Periodo.

Abstract

Characterization of structural models by simulation of Ibague earthquakes on a seismic table

In the following research work, analytical and experimental methods are applied, with the aim of understanding the relationship that exists between the dynamic characteristics of a set of real buildings and the construction of structural models that try to represent them by characterizing their dynamic properties as its natural period of vibration, based on a set of acceleration records that print a lateral thrust considering the earthquakes in the city of Ibague (Tolima) and its location, as well as other seismically active regions, to obtain a response using a simulated environment. in seismic tables that allow understanding the structure implemented in each of the buildings with different types of use defined in the Colombian Regulation of Seismic Resistant Construction, NSR-10. The investigation is supported by obtaining and identifying a database of records from the microzoning of Ibague and recent earthquakes for a determined period of time. This is how the areas of the city that refer to some type of probable threat are identified, with respect to the seismic variables and their behavior with real design data, complying with current regulatory guidelines, given their real design relationship with respect to the structural models that represented by characterizing their dynamic behavior. From the approximate analysis as a result of the seismic table simulation that a structure may have, with probable architectural and structural configurations, such as those found in the city of Ibague, in order to reduce the seismic risk and promote the design earthquake resilient structures.

Keywords: Characterization, Seismicity, Structural Model, Seismic Table, Structure, Period.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras.....	XIII
Lista de tablas	XVII
Introducción	1
1. Problema y justificación	3
1.1 Identificación del problema.....	3
1.2 Objetivos	4
1.3 Justificación de la investigación.....	4
2. Marco teórico.....	7
2.1 Sismicidad global	7
2.2 Sismicidad en Colombia.....	10
2.3 Sismicidad en la ciudad de Ibagué	16
2.3.1 Estudio de la falla de Ibagué.....	18
2.3.2 Dificultades en la evaluación de la amenaza sísmica de Ibagué debido a la escasez de datos	20
2.3.3 Microzonificación de la ciudad de Ibagué.....	20
2.4 Mesas sísmicas en el mundo	22
2.4.1 Implementación de mesa vibradora unidireccional para simulación sísmica y experimentación con modelos reducidos en Perú	22
2.4.2 Mesas sísmicas en Colombia	23
2.4.3 Modelación de perturbaciones dinámicas en estructuras: investigaciones realizadas en Colombia.....	23
2.4.4 Mesa sísmica Universidad Nacional de Colombia sede Manizales	24
2.5 Acerca de la Ciudad de Ibagué	25
2.5.1 Edificaciones en la Ciudad de Ibagué	26
3. Diseño de la metodología de investigación	31
3.1 Recolección de información	31
3.1.1 Características geológicas del terreno	31
3.2 Selección de los modelos estructurales.....	32
3.2.1 Estructura de uso III – institucional educativo de 3 pisos	33
3.2.2 Estructura de uso II – oficinas y locales comerciales de 3 pisos	36
3.2.3 Estructura de uso I – residencial de 5 pisos.....	39
3.3 Recolección de datos	42
3.3.1 Magnitud y registro	42

3.3.2	Acelerogramas de las señales sísmicas seleccionadas.....	43
3.3.3	Acelerogramas esperados de Ibagué según ASCE 7 - 22.....	49
3.3.4	Amenaza sísmica nacional sismo de armenia 1999	60
3.3.5	Amenaza sísmica internacional	61
3.4	Procesamiento de datos	61
3.5	Ajuste de los modelos.....	66
3.5.1	Modelo estructural institución educativa de tres pisos	67
3.5.2	Modelo estructural oficinas y locales comerciales de tres pisos	69
3.5.3	Modelo estructural residencial de cinco pisos.....	71
4.	Ensayo de los modelos estructurales en mesa sísmica	73
4.1	Resultados del modelo estructural de la institución educativa de tres pisos.....	75
4.2	Resultados del modelo estructural de las oficinas y locales comerciales de tres pisos	77
4.3	Resultados del modelo estructural residencial de cinco pisos	79
5.	Análisis y resultados de la caracterización de los modelos estructurales con sismos de Ibagué.....	83
6.	Conclusiones	109
6.1	Recomendaciones	115
A.	Anexo: Código para el cálculo de la señal de desplazamiento	117
B.	Anexo: Código para el cálculo de la señal de desplazamiento	118
C.	Código de licencia ETABS (Versión de Prueba).....	119
D.	Resultados de los ensayos de los modelos estructurales	120
E.	Datos de los sismos sintéticos de Ibagué, Armenia, Ecuador y Bolu.....	120
	Bibliografía	121

Lista de figuras

Figura 1–1: Ciudad de Ibagué	3
Figura 1–2: Localización de la ciudad de Ibagué (elaborado con ArcGIS)	5
Figura 2–1: Estadística mundial de muertes humanas por desastres naturales.....	7
Figura 2–2: Estadística mundial de pérdidas económica atribuidas a los desastres naturales	8
Figura 2–3: Contribución de la amenaza sísmica a las pérdidas económicas anuales promedio para Colombia (US\$3200'000.000).....	9
Figura 2–4: Índice de riesgo sísmico para el continente americano.	9
Figura 2–5: Mapa de Amenaza Sísmica.	12
Figura 2–6: Sismo de Armenia, Quindío en 1999.	13
Figura 2–7: Sismo Norte del Huila en 1967	14
Figura 2–8: Sismo Popayán, Cauca en 1983	15
Figura 2–9: Fallas Geológicas en la Ciudad de Ibagué.....	17
Figura 2–10: Fallas Activas en la Ciudad de Ibagué	18
Figura 2–11: Espectros de Diseño de la Microzonificación Sísmica de Ibagué.....	21
Figura 2–12: Mesa Sísmica Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales.....	25
Figura 2–13: Mapa de la Ciudad de Ibagué.....	26
Figura 2–14: Vista de algunos edificios en la Ciudad de Ibagué, Tolima	26
Figura 2–15: Institución Educativa Colegio Diego Fallón de 3 Pisos.....	27
Figura 2–16: Institución educativa en construcción Colegio la Sagrada Familia de 3 Pisos.	27
Figura 2–17: Edificio residencial de 5 Pisos en centro de la Ciudad.	28
Figura 2–18: Institución educativa en construcción Colegio Arboleda Campestre de 3 Pisos.	28
Figura 2–19: Edificio de oficinas de servicio público de Gas Alcanos de 3 Pisos.....	28
Figura 2–20: Institución educativa en construcción Colegio Normal Superior de 3 Pisos.	29
Figura 2–21: Edificio residencial de 5 Pisos en Barrio Belén.	29
Figura 3–1: Características del suelo.	32
Figura 3–2: Planta del edificio de diseño de la institución educativa de 3 pisos (unidades en metros).	33
Figura 3–3: Espectro de diseño de la institución educativa de 3 pisos.	34
Figura 3–4: Modelo Digital Institución educativa de 3 pisos.....	35
Figura 3–5: Planta del edificio de diseño de las oficinas y locales comerciales de 3 pisos (unidades en metros).....	36
Figura 3–6: Espectro de diseño de las oficinas y locales comerciales de 3 pisos.	37

Figura 3–7: Modelo Digital Oficinas y locales comerciales de 3 pisos	38
Figura 3–8: Planta del edificio de diseño residencial de 5 pisos (unidades en metros)..	39
Figura 3–9: Espectro de diseño residencia de 5 pisos.	40
Figura 3–10: Modelo Digital Residencial de 5 pisos	41
Figura 3–11: Registro del sismo de Ibagué del 22 de junio de 2022	43
Figura 3–12: Extensión de ETABS para generar señales sintéticas a partir de espectros de respuesta.	44
Figura 3–13: Programa en MATLAB para generar espectros de respuesta.	44
Figura 3–14: Mapa de localización de los espectros de amenaza de Ibagué	45
Figura 3–15: Acelerograma del sismo de Ibagué del 22 de junio de 2022.....	45
Figura 3–16: Espectro de respuesta institución educativa Carlos Lleras Restrepo.....	46
Figura 3–17: Señal sintética Col. Carlos Lleras R.	46
Figura 3–18: Espectro de respuesta Estación de bomberos	46
Figura 3–19: Señal sintética Estación de bomberos.....	47
Figura 3–20: Espectro de respuesta Cam la Pola	47
Figura 3–21: Señal sintética Cam la Pola.....	47
Figura 3–22: Espectro de respuesta Gobernación	48
Figura 3–23: Señal sintética Gobernación.....	48
Figura 3–24: Espectro de respuesta Col. Champagnat	48
Figura 3–25: Señal sintética Col. Champagnat	49
Figura 3–26: Espectro escalado para el sismo de Ibagué Cam la Pola - institución educativa.	50
Figura 3–27: Sismo Ibagué Cam la Pola Escalado – Institución educativa.....	51
Figura 3–28: Espectro escalado para el sismo de Ibagué Gobernación - institución educativa.	51
Figura 3–29: Sismo Ibagué Gobernación Escalado – Institución educativa.....	52
Figura 3–30: Espectro escalado para el sismo de Ibagué Col. Champagnat - institución educativa.	52
Figura 3–31: Sismo Ibagué Col. Champagnat Escalado – Institución educativa	53
Figura 3–32: Espectro escalado para el sismo de Ibagué Cam la Pola – oficinas y locales comerciales.....	53
Figura 3–33: Sismo Ibagué Cam la Pola Escalado – Oficinas y locales comerciales	54
Figura 3–34: Espectro escalado para el sismo de Ibagué Gobernación – oficinas y locales comerciales.....	54
Figura 3–35: Sismo Ibagué Gobernación Escalado – Oficinas y locales comerciales	55
Figura 3–36: Factor de Escala para el sismo Col. Champagnat– Oficinas y Locales comerciales.....	55
Figura 3–37: Sismo Ibagué Col. Champagnat Escalado – Oficinas y locales comerciales	56
Figura 3–38: Factor de Escala para el sismo Cam la Pola – Residencial	57
Figura 3–39: Sismo Ibagué Cam la Pola Escalado - Residencial	57
Figura 3–40: Factor de Escala para el sismo Gobernación – Residencial	58
Figura 3–41: Sismo Ibagué gobernación Escalado - Residencial.....	59

Figura 3-42: Factor de Escala para el sismo Col. Champagnat – Residencial	59
Figura 3-43: Sismo Ibagué Col. Champagnat Escalado - Residencial	60
Figura 3-44: Sismo de Armenia 25 de enero de 1999	60
Figura 3-45: Sismo de Armenia Escalado con el factor máximo esperado.....	61
Figura 3-46: señal de desplazamiento del sismo Ibagué Col. Carlos Lleras R.	62
Figura 3-47: señal de desplazamiento del sismo Ibagué Estación de bomberos.	62
Figura 3-48: señal de desplazamiento del sismo de Ibagué Cam la Pola.	62
Figura 3-49: señal de desplazamiento del sismo de Ibagué Gobernación.	63
Figura 3-50: señal de desplazamiento del sismo de Ibagué Col Champagnat.	63
Figura 3-51: señal de desplazamiento del sismo de Armenia enero 25 1999	63
Figura 3-52: señal de desplazamiento del sismo de Armenia enero 25 1999 Máxima esperada según ASCE 7 – 22	63
Figura 3-53: señal de desplazamiento sismo Ibagué Cam la pola Escalado para Institución educativa	64
Figura 3-54: señal de desplazamiento sismo Ibagué Cam la Pola Escalado para Oficinas y Locales comerciales	64
Figura 3-55: señal de desplazamiento sismo Ibagué Cam la Pola Escalado para Residencial.....	64
Figura 3-56: señal de desplazamiento sismo Ibagué Gobernación Escalado para Institución Educativa	64
Figura 3-57: señal de desplazamiento sismo Ibagué Gobernación Escalado para Oficinas y locales comerciales.....	65
Figura 3-58: señal de desplazamiento sismo Ibagué Gobernación Escalado para Residencial.....	65
Figura 3-59: señal de desplazamiento sismo Ibagué Col. Champagnat Escalado para Institución Educativa	65
Figura 3-60: señal de desplazamiento sismo Ibagué Col. Champagnat Escalado para Oficinas y Locales comerciales	65
Figura 3-61: señal de desplazamiento sismo Ibagué Col. Champagnat Escalado para Residencial.....	66
Figura 3-62: Señal de desplazamiento sismo de Ecuador 2016	66
Figura 3-63: Señal de desplazamiento sismo de Bolu 1999.....	66
Figura 3-64: Planta estructural del modelo estructural de la institución educativa para la mesa sísmica	68
Figura 3-65: Modelo digital de la institución educativa de tres pisos para mesa sísmica	69
Figura 3-66: Planta estructural del modelo estructural de las oficinas y locales comerciales para la mesa sísmica.....	69
Figura 3-67: Modelo digital de las oficinas y locales comerciales de tres pisos para mesa sísmica	71
Figura 3-68: Planta estructural del modelo estructural residencial para la mesa sísmica	71
Figura 3-69: Modelo digital residencial de cinco pisos para mesa sísmica.....	72

Figura 4–1: Estación de control de la mesa sísmica del laboratorio de estructuras de la universidad Nacional de Colombia sede Manizales	74
Figura 4–2: Datos obtenidos de un sismo de Ibagué en la estación de control de la mesa sísmica	75
Figura 4–3: Perspectivas del modelo estructural de la institución educativa sobre la Mesa Sísmica – Laboratorio de Estructuras- Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales.....	76
Figura 4–4: Perspectivas del modelo estructural de las oficinas y locales comerciales sobre la Mesa Sísmica – Laboratorio de Estructuras- Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales	78
Figura 4–5: Perspectivas del modelo estructural residencial sobre la Mesa Sísmica – Laboratorio de Estructuras- Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales	80
Figura 5–1: Cortante normalizada por cada sismo en el modelo estructural de la Institución educativa de 3 pisos comparada con la cortante de diseño por piso del edificio de diseño cumpliendo NSR 10	89
Figura 5–2: Cortante normalizada por cada sismo en el modelo estructural de las oficinas y locales comerciales de 3 pisos comparada con la cortante de diseño por piso del edificio de diseño cumpliendo NSR 10	91
Figura 5–3: Cortante normalizada por cada sismo en el modelo estructural residencial bifamiliar de 5 pisos comparada con la cortante de diseño por piso del edificio de diseño cumpliendo NSR 10	93
Figura 5–4: Derivas del modelo estructural de la institución educativa de tres pisos por cada sismo y derivas de diseño del edificio de diseño	96
Figura 5–5: Derivas del modelo estructural de las oficinas y locales de 3 pisos por cada sismo y derivas de diseño del edificio de diseño	98
Figura 5–6: Derivas del modelo estructural residencial de 5 pisos por cada sismo y derivas de diseño del edificio de diseño	101
Figura 5–7: Aceleraciones de piso por cada sismo para el modelo estructural de la institución educativa de 3 pisos y aceleraciones de diseño	104
Figura 5–8: Aceleraciones de piso por cada sismo para el modelo estructural de las oficinas y locales de 3 pisos y aceleraciones de diseño	106
Figura 5–9: Aceleraciones de piso por cada sismo para el modelo estructural residencial de 5 pisos y aceleraciones de diseño.....	108

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2–1: Valores de Intensidad MSK.....	12
Tabla 3–1: Información considerada en el espectro de diseño para la institución educativa de 3 pisos.....	33
Tabla 3–2: Derivas de piso del edificio de diseño correspondiente a la institución educativa de 3 pisos.....	35
Tabla 3–3: Periodos y Frecuencias del edificio de diseño institución educativa de 3 pisos.....	36
Tabla 3–4: Información considerada en el espectro de diseño para las oficinas y locales comerciales de 3 pisos.....	37
Tabla 3–5: Derivas de piso del edificio de diseño correspondiente a oficinas y locales comerciales de 3 pisos.....	38
Tabla 3–6: Periodos y Frecuencias del edificio de diseño oficinas y locales comerciales de 3 pisos.....	39
Tabla 3–7: Derivas de piso del edificio de diseño correspondiente a residencial de 5 pisos.....	41
Tabla 3–8: Periodos y Frecuencias del edificio Residencial de 5 pisos.....	42
Tabla 3–9: Factor de Escala para el sismo Cam la Pola - Institución educativa.....	50
Tabla 3–10: Factor de Escala para el sismo Gobernación - Institución educativa.....	51
Tabla 3–11: Factor de Escala para el sismo Col. Champagnat - Institución educativa...	53
Tabla 3–12: Factor de Escala para el sismo Cam la Pola – Oficinas y Locales comerciales.....	54
Tabla 3–13: Factor de Escala para el sismo Gobernación – Oficinas y Locales comerciales.....	55
Tabla 3–14: Factor de Escala para el sismo Col. Champagnat – Oficinas y Locales comerciales.....	56
Tabla 3–15: Factor de Escala para el sismo Cam la Pola – Residencial.....	57
Tabla 3–16: Factor de Escala para el sismo Gobernación – Residencial.....	58
Tabla 3–17: Factor de Escala para el sismo Col. Champagnat – Residencial.....	59
Tabla 3–18: Datos del modelo estructural de la institución educativa de tres pisos para la mesa sísmica.....	68
Tabla 3–19: Datos del modelo estructural de las oficinas y locales comerciales de tres pisos para la mesa sísmica.....	70

Tabla 3–20: Datos del modelo estructural residencial de cinco pisos para la mesa sísmica	72
Tabla 4–1: Desplazamientos y Aceleraciones máximas absolutas de cada sismo para el modelo estructural de la institución educativa	76
Tabla 4–2: Desplazamientos y Aceleraciones máximas absolutas de cada sismo para el modelo estructural de las oficinas y locales comerciales.....	78
Tabla 4–3: Desplazamientos y Aceleraciones máximas absolutas de cada sismo para el modelo estructural residencial.....	80
Tabla 5–1: Periodo natural de los modelos estructurales en mesa sísmica y los edificios de diseño	83
Tabla 5–2: Factor de Normalización del cortante del modelo estructural con el edificio de diseño para la institución educativa de 3 pisos con cada sismo	85
Tabla 5–3: Factor de Normalización del cortante del modelo estructural con el edificio de diseño para las oficinas y locales comerciales de 3 pisos con cada sismo.....	86
Tabla 5–4: Factor de Normalización del cortante del modelo estructural con el edificio de diseño residencial de 5 pisos con cada sismo.....	87
Tabla 5–5: Cortante de piso por cada sismo del modelo estructural del Institución educativa de 3 pisos normalizada comparada con la cortante de diseño por piso del edificio de diseño	88
Tabla 5–6: Cortante de piso por cada sismo del modelo estructural de oficinas y locales comerciales de 3 pisos normalizada comparada con la cortante de diseño por piso del edificio de diseño.	90
Tabla 5–7: Cortante de piso por cada sismo del modelo estructural residencial de 5 pisos normalizada comparada con la cortante de diseño por piso del edificio de diseño.	92
Tabla 5–8: Relación de derivas entre el modelo estructural de la institución educativa de tres pisos y el edificio de diseño.....	94
Tabla 5–9: Relación de derivas entre el modelo estructural de las Oficinas y Locales comerciales de tres pisos y el edificio de diseño	96
Tabla 5–10: Relación de derivas entre el modelo estructural de la Residencia Bifamiliar de cinco pisos y el edificio de diseño	99
Tabla 5–11: Grado de Desempeño mínimo requerido NSR 10 Tabla A.9.2-1.....	102
Tabla 5–12: Aceleraciones de piso de acuerdo con la NSR 10 para cada modelo estructural	102
Tabla 5–13: Relación de aceleraciones del modelo estructural de la institución educativa de 3 pisos y el edificio de diseño con NSR 10.....	103
Tabla 5–14: Relación de aceleraciones del modelo estructural de las oficinas y locales comerciales de 3 pisos y el edificio de diseño con NSR 10	105
Tabla 5–15: Relación de aceleraciones del modelo estructural residencial de 5 pisos y el edificio de diseño con NSR 10	107

Introducción

Desde que se tienen registros se ha identificado la ocurrencia de sismos a nivel global, los cuales han producido daños a la infraestructura de las ciudades y la pérdida de vidas humanas y de animales; debido a estas consecuencias catastróficas, a nivel nacional se han desarrollado estudios e investigaciones dirigidas a la descripción de la respuesta de las estructuras ante la ocurrencia de eventos de carácter dinámico, con el propósito de generar especificaciones normativas de diseño sismo resistente y construcción segura.

Colombia se encuentra en una zona sísmica alta, debido a que limita con el cinturón de fuego del pacífico en su zona costera, además, cuenta con una cadena volcánica activa, la cual se considera relativamente nueva, formada debido al efecto de subducción de la placa oceánica sobre la continental, lo anterior genera la liberación una gran cantidad de energía, lo cual conlleva efectos sobre la superficie, conocidos como sismos. Esta situación presente en el país logra plantear diferentes niveles de estudio, que permiten el establecer diferentes métodos para enfrentar una amenaza de carácter impredecible, por lo anterior, al interior del país se requiere zonificar sus niveles de amenaza.

Para la ciudad de Ibagué, la cual se encuentra ubicada en un lugar de amenaza sísmica, debido a su proximidad a fuentes cercanas de actividad sísmica como lo es el Quindío, fuentes volcánicas activas como El Volcán Cerro Machín, el Volcán Nevado del Tolima y el Volcán Nevado del Ruiz y fallas de tamaño importante de acuerdo con el estudio de microzonificación sísmica, como lo son: Ibagué, Palestina, Cucuana y Romeral, los movimientos generados por este tipo de fuentes presentan un comportamiento errático, por lo que se hace necesario identificar la manera más confiable de reducir el riesgo sísmico y propender por el diseño de estructuras resilientes a terremotos. Para la caracterización de la amenaza se obtuvieron registros de aceleración, los cuales pueden ser utilizados para establecer parámetros estructurales e identificar las posibles variables de una estructura sismo resistente. Mediante diferentes experimentos, realizados a través de la implementación de una mesa sísmica, se pudo dar a conocer el comportamiento de las estructuras ante los efectos causados por los sismos de Ibagué. Adicionalmente, se adquirieron datos de los modelos estructurales con distintas configuraciones y tipos de uso, en donde se definen parámetros en términos de desplazamientos y aceleraciones, por medio de la implementación de acelerómetros como una red de instrumentación.

1. Problema y justificación

1.1 Identificación del problema

La ciudad de Ibagué, ubicada en el departamento del Tolima, ha presentado históricamente una actividad sísmica importante, además, ha tenido un alto crecimiento de la infraestructura en los últimos años. Como consecuencia, las edificaciones construidas allí, deben presentar un comportamiento sísmico adecuado. Por lo anterior, se hace necesario caracterizar las edificaciones de tal manera que se conozcan sus propiedades dinámicas y se puedan ajustar modelos estructurales frente a la amenaza presente en la región. De acuerdo con lo expuesto, se plantea el siguiente interrogante: ¿Hasta qué punto la experimentación en mesa sísmica con modelos estructurales de edificios reales puede llegar a replicar los fenómenos producidos por solicitaciones sísmicas de Ibagué y la interacción con las estructuras del entorno?

Figura 1–1: Ciudad de Ibagué



Fuente: el Autor

1.2 Objetivos

General

- Caracterizar modelos estructurales mediante simulación de sismos de la ciudad de Ibagué en mesa sísmica

Específicos

- Identificar y obtener registros sísmicos ocurridos en la ciudad de Ibagué.
- Implementar una mesa sísmica que permita simular la sismicidad de la ciudad de Ibagué.
- Construir modelos estructurales en 2D y 3D de uno y varios grados de libertad, que permitan reproducir de forma aproximada su comportamiento dinámico bajo movimientos sísmicos en su base, ocurridos en la ciudad de Ibagué.
- Probar los modelos estructurales en 2D y 3D, bajo ensayos dinámicos utilizando la mesa sísmica con sismos ocurridos en la ciudad de Ibagué.
- Caracterizar la respuesta dinámica de los modelos estructurales, en 2D y 3D, a partir de los resultados de los ensayos.

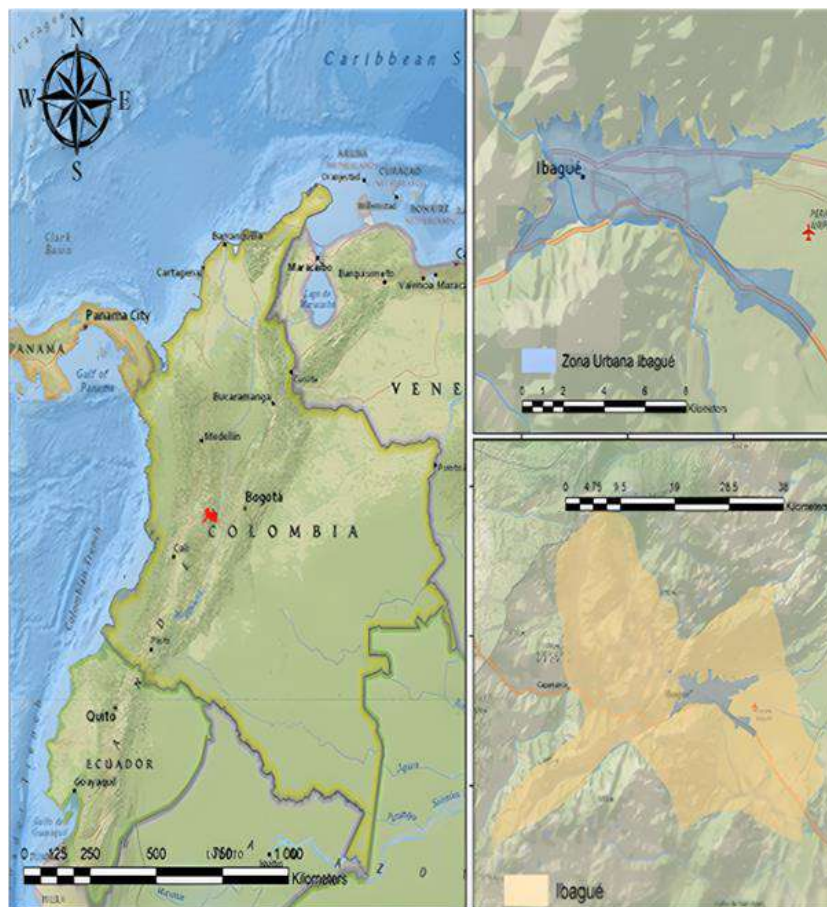
1.3 Justificación de la investigación

La investigación se realizó con la necesidad de obtener conocimiento detallado del comportamiento dinámico de algunas edificaciones seleccionadas, para plantear y sugerir recomendaciones ante las autoridades administrativas, que sea posible llegar a implementar en el monitoreo de salud estructural, en el diseño y actualización de los códigos que actualmente rigen los procesos constructivos en Colombia, y contribuir al desarrollo de proyectos que promuevan el monitoreo de estructuras, como una herramienta para el desarrollo sostenible de la ciudad de Ibagué.

El desarrollo de modelos y la experimentación mediante simulación en una mesa vibratoria en la región permitiría observar y determinar el comportamiento dinámico de un modelo de estructura a escala a partir de la determinación de los efectos producidos por cambios en masa y rigidez, por medio de la verificación con métodos matemáticos y con la ayuda de acelerómetros con los cuales se caracterizarían las variables dinámicas de modelos de estructuras seleccionados en el estudio. A partir de un análisis espectral de señales de vibración se podrían identificar diferentes métodos para el cálculo del amortiguamiento, recreando la interacción suelo estructura se puede comprobar cómo se comportan los diferentes tipos de suelo respecto a las estructuras, de esta manera entender el

comportamiento en la base y los supuestos de empotramiento, y mediante los análisis por varios grados de libertad en tres (3) dimensiones obtener las fuerzas y desplazamientos que actúan sobre los modelos estructurales.

Figura 1–2: Localización de la ciudad de Ibagué (elaborado con ArcGIS)



Fuente: el Autor

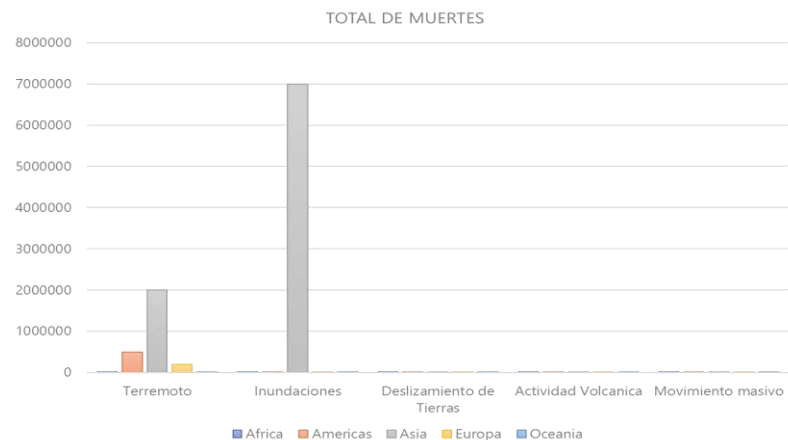
2.Marco teórico

2.1 Sismicidad global

El desconocimiento de las variables cinemáticas que describen el comportamiento de una estructura que ha sido perturbada en su base genera limitaciones para la observación experimental y el análisis de la respuesta dinámica de sistemas bajo la acción de fuerzas sísmicas. Por esta razón se han implementado máquinas que permitan simular de manera experimental movimientos sísmicos con el objetivo de reproducir las cargas actuantes en un modelo parametrizado.

La naturaleza de los desastres atribuidos a los fenómenos sísmicos a nivel mundial los ha clasificado como la primera fuente de pérdidas humanas y económicas en la historia de la humanidad. La magnitud de sus efectos se ha medido principalmente en términos de cantidad de muertes y millones de dólares de inversión en infraestructura destruida. Sin embargo, algunos fenómenos naturales tienen mayor impacto negativo que otros (Figura 2-1). Estadísticas mundiales revelan que, durante los últimos cien (100) años, la ocurrencia de inundaciones y terremotos han generado el 98% de la muerte de 10'000.000 de personas, aproximadamente, siendo la primera más devastadora (CRED, 2016).

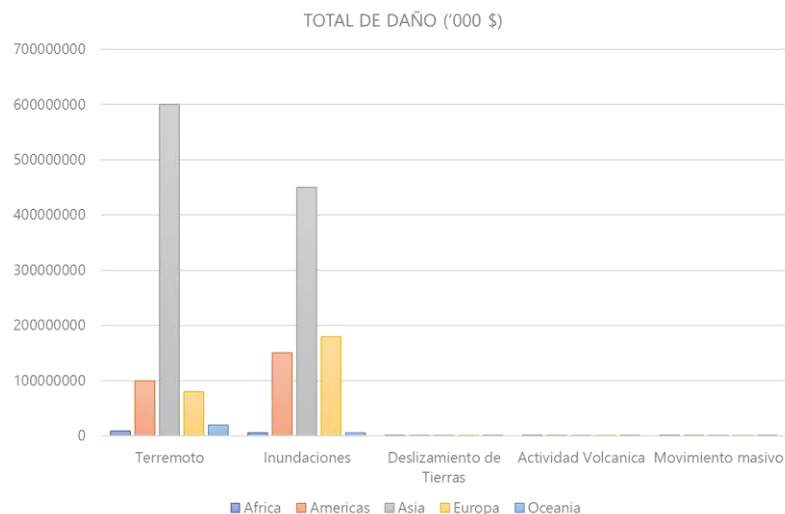
Figura 2–1: Estadística mundial de muertes humanas por desastres naturales



Fuente: CRED,2016

En el contexto económico, se ha estimado que, del total de pérdidas materiales en el mundo por desastres naturales, un 52% se debe a los efectos desastrosos de los sismos (Figura 2-2), por lo que resulta necesario y pertinente generar estrategias que contribuyan a disminuir las cifras anteriores, mediante el estudio del fenómeno como fuente del problema en torno al riesgo.

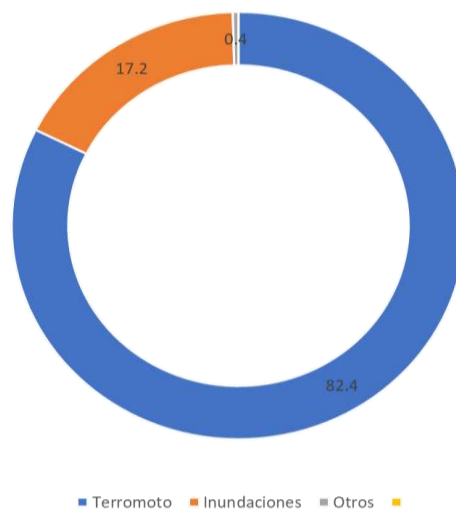
Figura 2-2: Estadística mundial de perdidas económica atribuidas a los desastres naturales



Fuente; CRED,2016

Para el caso particular de Colombia, en la actualidad el mayor porcentaje de pérdidas económicas anuales está representado por la amenaza sísmica (Figura 2-3), estudios probabilísticos han proyectado para 50 años, las máximas pérdidas probables alcanzan los US\$21.000'000.000 (World Bank, 2016):

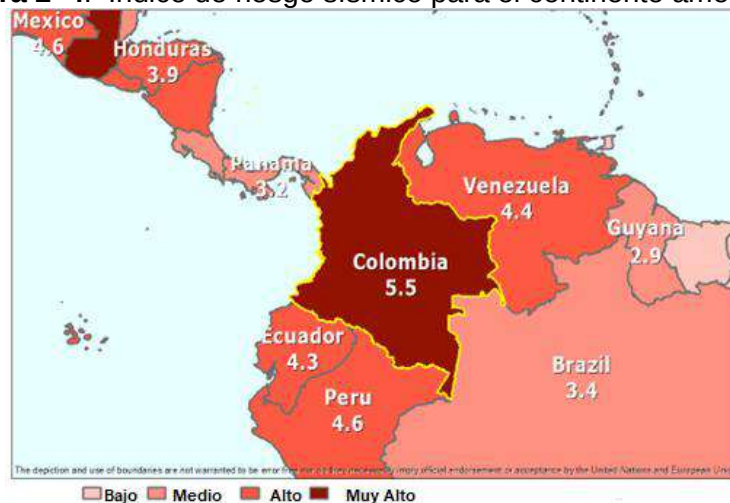
Figura 2–3: Contribución de la amenaza sísmica a las pérdidas económicas anuales promedio para Colombia (US\$3200'000.000).



Fuente: WorldBank, 2016

Si se integran los aspectos de exposición y disminución del riesgo sísmico y propender por el diseño de estructuras resilientes a terremotos para el cálculo de la amenaza. Teniendo en cuenta la fragilidad del sistema socioeconómico, es posible obtener un índice de riesgo que supera el de otros países en el continente suramericano.

Figura 2–4: Índice de riesgo sísmico para el continente americano.



Fuente: INFORM, 2015

Teniendo en cuenta que en la zona de sismicidad intermedia a alta en el mundo más del 90% de sus habitantes viven y trabajan en edificaciones no han sido diseñadas bajo los conceptos fundamentales de la ingeniería sísmica, y que el mayor número de pérdidas humanas durante los eventos sísmicos han ocurrido debido al colapso de esta tipa de infraestructura, se hace evidente la necesidad de introducir consideraciones de resistencia sísmica en su construcción. La experiencia ha demostrado que, para edificaciones nuevas, la exigencia del cumplimiento de requisitos mínimos de sismo resistencia representa una defensa crítica ante los efectos devastadores inducidos por los sismos (UNESCO, 2014). Ante la imposibilidad de controlar la frecuencia y magnitud con que suceden los eventos sísmicos, es necesario recurrir a estrategias para la disminución del riesgo sísmico y propender por el diseño de estructuras resilientes a terremotos, ante los efectos negativos de este fenómeno, en términos de infraestructura inteligente, concebida y diseñada para resistir determinados niveles de fuerza inducidos por los movimientos del terreno, sin poner en riesgo la vida de las personas. Para ello, la ingeniería se ha dedicado durante los últimos 50 años a comprender el comportamiento dinámico de los diferentes tipos de estructuras civiles que sirven a la sociedad.

En el mundo, en los principales sitios que interactúan y viven de estos desconocimientos de los parámetros dinámicos causados por los sismos. Se han implementado simulaciones mediante mesas vibratorias con el fin de comprender estos eventos con el fin de recrear experimentos que permitan dar un acercamiento a las causas y efectos que provocan los sismos en el mundo. A partir de este acercamiento se puede conocer mejor el comportamiento de las estructuras, lo cual permite dar solución a diferentes incógnitas y a concebir de mejor manera la configuración de las estructuras respecto a su zona de amenaza en cual en este caso en particular se refieren a daños por sismos, por esta razón el hecho es simular los posibles movimientos en la base para evitar grandes daños en los elementos de la estructura, evitar pérdidas económicas, pérdida de bienes materiales y lo más importante proteger la vida de las personas.

2.2 Sismicidad en Colombia

La información registrada en los catálogos de sismicidad colombiana, donde se tienen numerosos sismos de magnitud superior a 7.0 han sido atribuidos a los sistemas de fallas del territorio colombiano.

El análisis de esta información muestra que existen fundamentalmente dos tipos de eventos sísmicos dentro del contexto tectónico de nuestro país:

1. "Los sismos relacionados con la zona de subducción de Nazca cuyas profundidades aumentan progresivamente desde la Costa Pacífica hacia la Cordillera de Los Andes." ("Informe Final Armenia | PDF | Temblores | Falla (geología)")
2. Los sismos relacionados con los sistemas de fallas que afectan la corteza continental plegada y deformada a lo largo y ancho de las cordilleras colombianas.

Las magnitudes de los sismos de subducción son considerables, habiéndose registrado cuatro sismos de magnitudes superiores o vecinas de 8.0 en el último siglo. Estos sismos, cuyos epicentros están situados al Suroccidente de Colombia (zona de Tumaco), se sitúan a lo largo de la falla que separa la placa oceánica que subduce de la placa continental suprayacente. La profundidad de estos sismos considerados "interplaca" está en el rango comprendido entre 10 y 60 km. Estos sismos manifiestan la deformación interna de la placa oceánica que subduce, y pueden tener magnitudes superiores a 7 Ms. Los sismos de corteza en el territorio colombiano han devastado distintas regiones del país a lo largo de la historia. Se destacan entre éstos los de Honda, el Borde Llanero, Cúcuta, Popayán y Armenia ocurridos en 1805, 1827, 1875, 1983, 1999 respectivamente (Espinosa 1996). ("Informe Final Armenia | PDF | Temblores | Falla (geología)") Estos sismos están relacionados con sistemas activos que afectan a la corteza superior y generan daños sustanciales en la zona epicentral, debido a la poca profundidad del hipocentro (menor de 20 km).

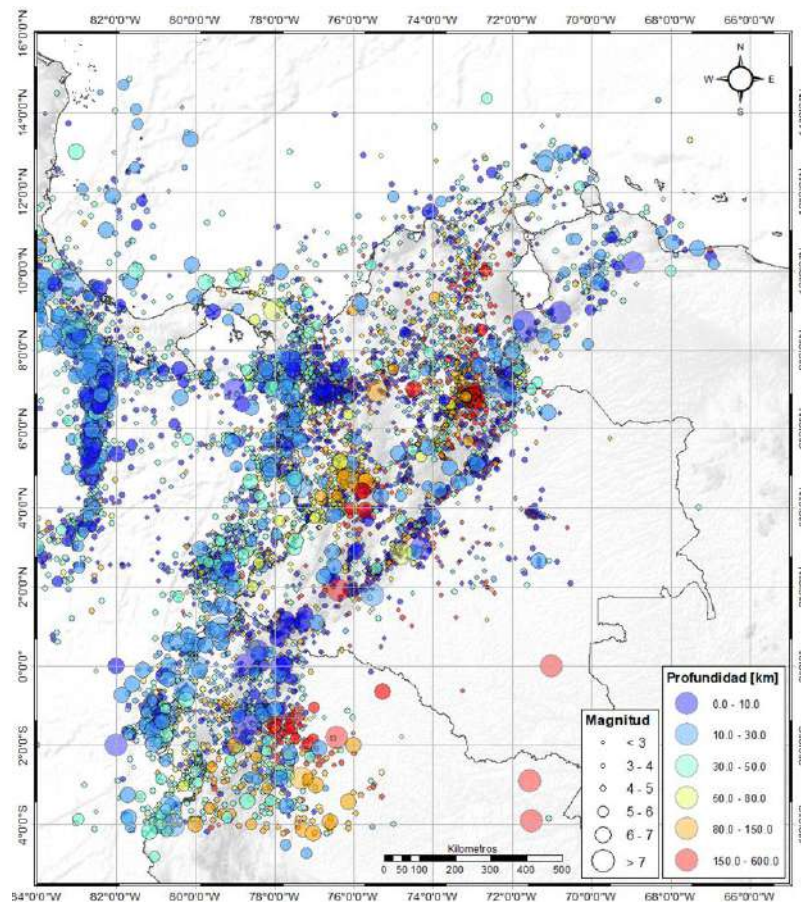
En el siglo XX se registraron 16 sismos de magnitud mayor a 7.0, muchos de los cuales corresponden a fallas continentales de corteza. Se destacan, además de los sismos de subducción, el sismo del Borde Llanero de 1967 y el de Murindó (Chocó) de 1992.

En la tabla 1 se muestran valores de intensidad MSK:

Tabla 2–1: Valores de Intensidad MSK

Nivel de I	Descripción de Daños
I a III	No sentido o sentido por pocas personas
IV a VI	Sentido, daños leves
VII a IX	Daños severos
X	daño total en construcciones
XI a XII	Daño total en construcciones y efectos permanentes en la topografía

El Servicio Geológico Colombiano a integrado todo su catálogo sísmico en un mismo mapa. En donde se han registrado eventos sísmicos desde el año 1610 hasta el 2014, en la escala de magnitudes de momento (MW) entre el rango de 2.9 y 8.8 que alcanzan profundidades hasta de 700 Km. En el catálogo se tiene registro de más de 34.681 eventos.

Figura 2–5: Mapa de Amenaza Sísmica.

Fuente: Servicio geológico colombiano (SGC)

En el país, las zonas donde existen mayores probabilidades de terremotos o movimientos telúricos se centran en las regiones occidental y centra, principalmente esta actividad se debe a que las cordilleras son relativamente nuevas debido al proceso de subducción que se presenta entre la placa oceánica y continental, resaltando también la cercanía al cinturón de fuego del pacifico. Respecto a la amenaza activa que se encuentra en el país se puede mencionar un evento que marca este fenómeno el cual es el sismo ocurrido en Armenia el mes de enero de 1999 es la evidencia del aumento sísmico que se genera a causa de la interacción entre placas (la placa de Nazca, la cual se traslada hacia la plataforma continental de Suramérica). Esas grandes presiones eventualmente liberadas son las responsables de los movimientos sísmicos en el territorio colombiano y los demás países suramericanos que tienen costa en el Pacífico, inclusive Bolivia que, aunque no cuenta con zona costera, se ve influenciado por la falla. (Servicio Geológico Colombiano, 2018)

Figura 2–6: Sismo de Armenia, Quindío en 1999.



Fuente: Servicio geológico colombiano (SGC)

Este y otros fenómenos telúricos que hayan ocurrido en Colombia entre el año 1610 y 2014, pueden ser evidenciados y consultados en el catálogo Sísmico Integrado (CSI) en el sitio web del Servicio Geológico Colombiano, el cual es una base de datos sísmica con

la información correspondiente a localización, profundidad, magnitud, fecha y hora de dichos eventos, entre otras propiedades de utilidad, cuenta con un total de 34.681 eventos, con magnitudes (M_w) que varían entre 2.9 y 8.8, y profundidades cercanas a 700 km, es importante resaltar que han existido otros eventos que han afectado al país, sin embargo por la falta de instrumentación muchos de ellos no se han logrado registrar.

Figura 2-7: Sismo Norte del Huila en 1967

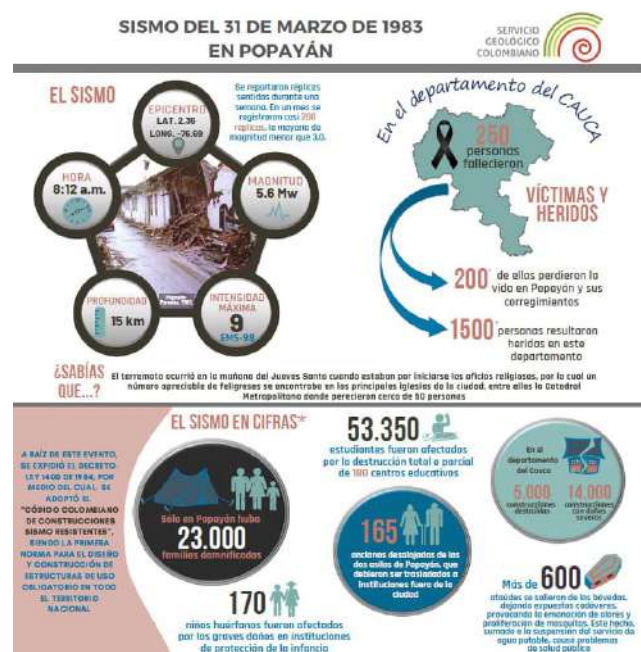


Fuente: Servicio geológico colombiano (SGC)

De este evento sísmico ocurrido se encontró información relevante donde se puede caracterizar la serie de daños generados, como lo son las pérdidas humanas y materiales a causa de deslizamientos generados por el movimiento del terreno, otros daños causados se evidenciaron en las carreteras entre Ibagué – Cajamarca, Roncesvalles – Rovira, Garzón – Pitalito, entre otras zonas afectadas lo cual implica reducción en movilidad intermunicipal e interdepartamental. El evento sísmico causó daños significativos en el departamento del huila, cerca de 8000 edificaciones resultaron destruidas o averiadas, se presentaron colapsos de muros de cerramientos los cuales se consideran en normativas actuales como elementos no estructurales. Teniendo en cuenta este tipo de eventos se empezaron a generar en el país códigos de construcciones sismo resistentes, además de investigaciones para tratar de parametrizar la amenaza y reducir la incertidumbre.

De acuerdo con estudios que se empezaron a generar a causa de estos eventos que en gran medida afectan al territorio colombiano se resaltan otros eventos como el sismo de Popayán en 1983, a raíz de este suceso se expidió el decreto Ley 1400 de 1984, por medio del cual se adoptó el CODIGO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIONES SISMO RESISTENTES, siendo la primera norma establecida para el diseño y construcción de estructuras de uso obligatorio en todo el país.

Figura 2–8: Sismo Popayán, Cauca en 1983



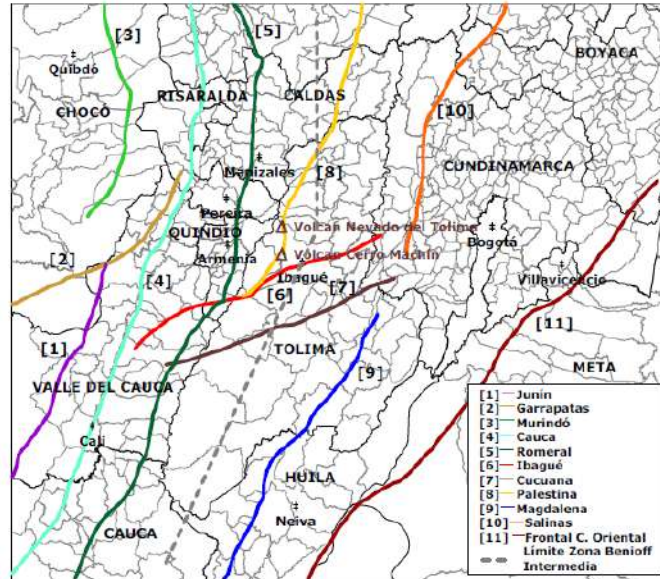
Fuente: Servicio geológico colombiano (SGC)

El evento causó efectos en el terreno que ocasionaron deslizamientos y grietas en estructuras, se observaron agrietamientos en el suelo del aeropuerto y escuelas, colapso de elementos viales, otros daños evidenciados fueron colapsos de edificaciones de 4 pisos en concreto reforzado pertenecientes a un conjunto residencial. Se logró concluir a causa de estos efectos que se generaron efectos de sitio además de tener una alta disminución del riesgo sísmico y propender por el diseño de estructuras resilientes a terremotos. Los sucesos de estas características han impulsado a nivel nacional, estudios específicos de amenaza sísmica sobre todo el territorio colombiano (AIS, 2009); sin embargo, para algunos territorios, como el departamento del Tolima no se tiene aún un estudio de

amenaza sísmica que contemple las condiciones sismológicas específicas del terreno en esta zona. Se han adelantado estudios en los que se desarrollan modelos de análisis morfotectónica para la falla de Ibagué que en caso de entrar en actividad podría afectar a toda la región (Diederix et. Al., 2006).

2.3 Sismicidad en la ciudad de Ibagué

Con la finalidad de identificar y obtener la sismicidad de la ciudad de Ibagué a continuación se describe la sismicidad a la que se encuentra expuesta, a los posibles efectos de la magnitud del movimiento de la Falla Ibagué (Diederix, et. al, 2006) de la cual se tiene muy poca información de su comportamiento, además de su cercanía al nevado volcán del Tolima y el volcán machín. Existen pocos indicios de investigación en el tema referente a la respuesta dinámica de las edificaciones ante los efectos de cargas sísmicas provocados por el entorno en el que se encuentra la ciudad de Ibagué. Sin embargo, mediante la simulación por medio de la mesa de vibración la que nos permite reproducir frecuencias con el propósito de simular acciones dinámicas sobre modelos a escala mediante experimentación con diferentes configuraciones y aisladores que representen las edificaciones en estudio. Los propósitos de dichos trabajos abarcan principalmente el mejoramiento de la calidad de los procesos enseñanza-aprendizaje en los cursos de Análisis estructural, Análisis Dinámico, resistencia de materiales y conocimiento general para la población ya que el desconocimiento de estos eventos y lo que pueden causar es bastante alto; Se puede resaltar que las iniciativas de investigación en los semilleros y grupos, para dar solución a interrogantes sobre las herramientas educativas que pueden generarse para el estudio de la interacción entre la infraestructura de las ciudades y la amenaza sísmica en el país, con el fin de reducir el riesgo, a través de la disminución de los altos índices de riesgo sísmico en la parte estructural de los sectores urbanos. La figura 2-9 muestra el estilo estructural para la cuenca del río Combeima, donde se aprecian fallas de manera esquemática que se encuentran en la ciudad de Ibagué.

Figura 2–10: Fallas Activas en la Ciudad de IbaguéFuente: www.ibague.gov.co

2.3.1 Estudio de la falla de Ibagué

Para identificar y obtener registros sísmicos de la ciudad de Ibagué, en el año 2004, INGEOMINAS ahora el SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO, realizó el estudio de “Paleo sismología de la Falla de Ibagué”, donde se estudió la geología, sismicidad, contexto de amenaza, cinemática y ruptura de la falla, así como su evolución histórica y contexto geológico y geomorfológico local. En dicho estudio se emplearon imágenes de fotografías aéreas a diferentes escalas para realizar la interpretación morfotectónica de la falla, que permitió proponer la geometría, el estilo de deformación y algunas características cinemáticas. A partir de estas características generales, junto con datos geográficos, climáticos y sedimentológicos, se escogió el mejor sitio de exploración paleo sismológica, donde una trinchera de exploración fue excavada procurando que la traza de la falla cortara por el sitio de la trinchera, y que el sitio no presentara erosión natural ni intervención antrópica. La trinchera fue excavada en la Finca Los Gnomos, al Nororiente de la ciudad de Ibagué, en cercanías a la vereda Chucuní, sobre el Abanico de Ibagué. De los datos tomados en la trinchera fue posible determinar desplazamientos sísmicos locales y tasas de actividad. El estudio permitió obtener las siguientes conclusiones principales:

La Falla de Ibagué es una estructura de tipo transcurrente dextral (falla de rumbo lateral derecha), que se extiende transversalmente por la Cordillera Central en dirección ENE,

hasta alcanzar la formación Abanico de Ibagué donde su rumbo cambia ligeramente en dirección E, bordeando el contorno norte del Abanico.

A partir de las mediciones realizadas en la trinchera de exploración, se estimó una tasa de desplazamiento promedio de 0.77 mm/año, calculada a partir de una diversidad de eventos sísmicos con desplazamiento promedio de 1.44 m. Dicho desplazamiento corresponde a una magnitud máxima probable M_s de 6.9, con un periodo de retorno aproximado de 1300 años, según las correlaciones propuestas por Wells y Coppersmith en 1994.

A partir de mediciones realizadas sobre el mapa morfotectónica de la Falla de Ibagué, se determinó un segmento de ruptura de 60 Km de longitud, correspondiente al segmento más continuo que se ubica entre el nacimiento del río Cocora y la población de Piedras. Empleando las correlaciones propuestas por Wells y Coppersmith en 1994, se obtiene una magnitud máxima probable M_s de 7.1 para la longitud de ruptura especificada. Como conclusión, el estudio estima una magnitud última probable M_s de 7 ± 0.1 .

Adicionalmente, la profundidad de la fuente sísmica estaría relacionada con la presencia del basamento, el cual es muy superficial bajo el Abanico Ibagué y, por lo tanto, se esperarían sismos superficiales.

A partir de estas conclusiones principales, se establece el modelo sísmológico de la Falla de Ibagué a partir de una comparación entre los valores reportados por el Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia (AIS, 1997), y el estudio de Paleo sísmología de la Falla de Ibagué (INGEOMINAS, 2004). Se establece dicho modelo con base en lo siguiente:

- La magnitud máxima probable para la Falla de Ibagué, para efectos de evaluación de amenaza local, se establece en 6.5. Este valor resulta inferior al anteriormente reportado en el estudio de Paleosismología de la falla, pero superior al estimado con base en la sismicidad observada.
- Los demás parámetros de sismicidad se establecen iguales a los determinados por el Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia, calculados a partir de la asignación geográfica de eventos sísmicos a la falla.

2.3.2 Dificultades en la evaluación de la amenaza sísmica de Ibagué debido a la escasez de datos

Al momento de identificar y obtener registros sísmicos de la ciudad de Ibagué, se presenta una evaluación probabilística de la amenaza sísmica, en la cual se tiene como parámetros base eventos sísmicos previos los cuales se consultaron en los catálogos USGS e ISC. Servicio Geológico de Estados Unidos, USGS (2009), incluye los datos del proyecto Sisra (Programa para la Mitigación de los Efectos de los Terremotos en la Región Andina) realizado por el Ceresis, para el periodo comprendido entre 1595 y 1980. (“Dificultades en la evaluación de la amenaza sísmica de ... - ResearchGate”) Para el lapso entre 1980 y 2009, los datos corresponden al PDE (Preliminary Determinations of Epicenters).

El estudio pretendió dar a conocer la falla de Ibagué y la posibilidad de generar sismos lentos, callados y silenciosos. cuando se piensa en una fuente sísmica, se piensa en una grieta que se propaga a través de la corteza; bajo este parámetro se planteó lo siguiente ¿Qué pasa, por ejemplo, con eventos paulatinos del terreno (tipo creep) en las fallas de San Andrés, Hayward y Calaveras en California, en las que la propagación a lo largo de la falla ocurre a tasas menores a un metro por segundo, y el desplazamiento es de milímetros por año? Bajo esta pregunta el trabajo se permitió concluir que Ibagué es una ciudad ubicada en un contexto geológico y geotécnico de amenaza sísmica importante, debido a la heterogeneidad de los suelos y las fallas activas que atraviesan el casco urbano. Sin embargo, se debe mejorar la instrumentación del área, preferiblemente con la instalación de equipos de banda ancha y sistemas geodésicos para monitorear más y mejor la falla de Ibagué. (Romero Mario y Alfaro Andrés. Universidad de las Andes y la Salle Bogotá, 2009).

2.3.3 Microzonificación de la ciudad de Ibagué

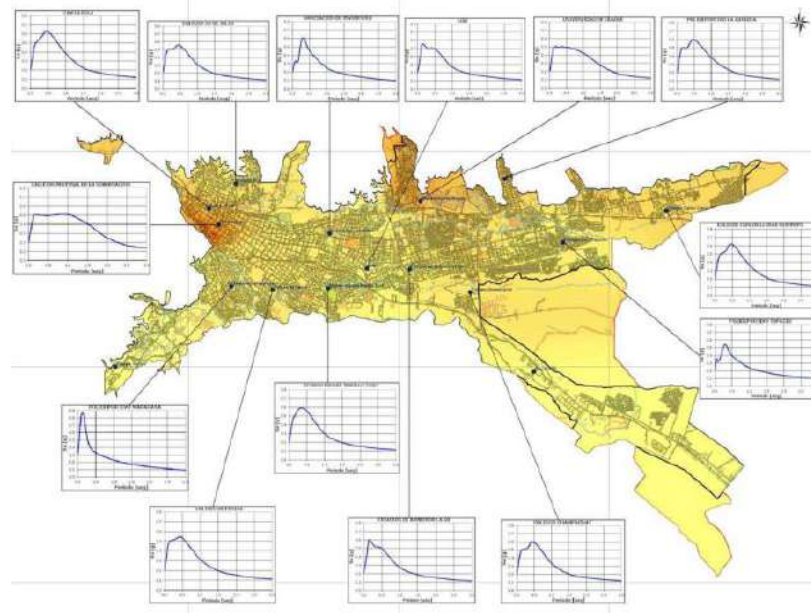
El estudio de la microzonificación sísmica realizado en el año 2004 pretende dar a conocer los espectros sísmicos a nivel del suelo o en terreno firme dependiendo del tipo de cimentación en el que se apoya el edificio y de las probables señales de aceleración que se pueden tener en la ciudad de Ibagué, el estudio tiene como parámetros base un amortiguamiento crítico del 5% y periodo de retorno de 475 años.

A los espectros resultantes del análisis a la respuesta dinámica se les realiza un suavizado por incertidumbre en el periodo estructural, con el fin de atenuar los picos y los valles del

espectro de amenaza presentado en la zona con periodos inferiores a 0.5 segundos. Obteniendo así, los espectros de diseño finales propuestos en el mapa de microzonificación de Ibagué.

Ibagué se encuentra casi en su totalidad sobre depósitos de suelo variados intercalándose entre estratos generalmente poco profundos, de arenas y limos arcillosos con algunas capas de arcillas limosas y/o arcillas pertenecientes al Abanico de Ibagué, tal como se verifico en la exploración geotécnica. Además, los espectros resultantes del análisis de respuesta dinámica muestran heterogeneidad a la respuesta sísmica generalmente en periodos estructurales menores de 0.5 segundos. Tomando en cuenta la poca profundidad de los estratos componentes, se normalizan los espectros con relación al especificado en la NSR-98 Ley 400 año 1997, para un perfil S1 y un nivel S_a de 0.2 g. La figura 2-11 muestra los espectros de diseño aconsejados y los compara con los espectros de amenaza uniforme del análisis de respuesta dinámica y el espectro de la NSR-98 de suelo firme, para los puntos considerados.

Figura 2–11: Espectros de Diseño de la Microzonificación Sísmica de Ibagué.



Fuente: Microzonificación sísmica de Ibagué

2.4 Mesas sísmicas en el mundo

La mesa de vibración o simulador sísmico es una máquina la cual es capaz de reproducir ensayos experimentales en estructuras que se vean afectadas por movimientos en su base con el objetivo de probar su resistencia. La máquina puede imponer vibraciones de diferente frecuencia a elementos o modelos de estructuras, reproduciendo el movimiento del suelo en caso de terremotos.

A nivel global se tienen referentes de proyectos a escala comparables con el propuesto en este documento: en la Universidad de Almería España se ha diseñado un simulador sísmico portátil que, con el fin de mover masas elevadas, emplea una masa de reacción con peso entre 30 y 50 veces la masa del simulador, necesaria para reducir al máximo el movimiento aleatorio de la plataforma, ya que realiza pruebas sobre modelos físicos a escala.

Otros experimentos, se basan en el anclaje de simuladores a elementos rígidos (Almería et al., 2013). En Ahmed abad, India se han desarrollado investigaciones para realizar los modelos de dos mesas vibratorias uniaxiales de baja y alta frecuencia. Para que en este tipo de simuladores se represente la condición de fijación de la estructura al suelo, la lámina superior de la mesa debe ser surtida por una cantidad de agujeros, logrando así la posibilidad de instalar cualquier tipo de modelo físico y conseguir la fijación de dos modelos simultáneamente para estudiar y comparar el comportamiento de estos. (Sanghvi, Patil, & Shah, 2012).

2.4.1 Implementación de mesa vibradora unidireccional para simulación sísmica y experimentación con modelos reducidos en Perú

El trabajo se enfoca en dar conocimiento acerca del comportamiento dinámico en el Perú el cual se encuentra en una zona sísmica alta debido a los movimientos de las placas de Nazca y la sub americana, que libera gran cantidad de energía y generan frecuentemente los sismos y terremotos. Los sismos causan daños a las estructuras y pérdidas de vidas en la población.

La construcción del simulador unidireccional se inició por la plataforma en la cual se colocarían el modelo a ensayar, debido a considerar diversos modelos con diferentes

pesos es que se optó por construir la plataforma de acero de 60 x 60 cm, considerando la escala de la mesa de 1/10. Se consideró perforar dicha plataforma con pequeños diámetros de 3/8", a cada 10 cm por toda la plataforma de manera simétrica, teniendo un total de 25 agujeros, los cuales tienen el propósito de poder colocar el modelo reducido, ensayarlos y conocer le comportamiento que tiene con este movimiento generado en la base que simula la del suelo en la realidad. (Ayllon López Diana. 2017)

2.4.2 Mesas sísmicas en Colombia

En el país se cuenta con pocas mesas vibratorias debido al alto costo de su construcción, operación y mantenimiento, aun así, estas herramientas son la opción más viable para la simulación e investigación en la dinámica estructural (Clavijo and Ramírez, 2011), es por esto por lo que algunas universidades han optado por su construcción o adquisición.

La tipología de la mesa generalmente permite elaborar ensayos en modelos de 1 grado de libertad para conocer sus propiedades dinámicas, y se debe tener presente la elaboración del programa el cual controla la mesa la cual le da una versatilidad de generar señales que permitan ver la interacción mesa modelo, y conocer su comportamiento mediante análisis de los datos generados.

2.4.3 Modelación de perturbaciones dinámicas en estructuras: investigaciones realizadas en Colombia

Dada la ocurrencia de eventos sísmicos durante los últimos años, se han realizado estudios e investigaciones para mitigar sus efectos sobre las estructuras a nivel global (Petersen et al, 2010), lo cual ha contribuido a definir mapas de amenaza sísmica. En Colombia, estos trabajos se han enfocado en la construcción de modelos físicos para la simulación de estructuras en mesas vibratorias para el análisis, diseño y rehabilitación de estructuras sismo-resistentes.

En este sentido La Universidad Militar Nueva Granada de Bogotá, ha desarrollado estudios de diseño mecánico, neumático, estructural y de control de una mesa vibratoria uniaxial para ensayos con estructuras a escala reducida. (Carrillo, 2012).

En el caso de la Universidad Industrial de Santander se han llevado a cabo investigaciones realizadas por los estudiantes de Ingeniería, como la determinación de la frecuencia

adecuada para una mesa vibratoria para que, durante las simulaciones, la respuesta de una estructura no sea distorsionada. Los resultados han contribuido a establecer relaciones entre el modelo reducido y el modelo real, conocido como principio de similitud. Lo cual ha contribuido a establecer la escala del prototipo para simular problemas que puedan surgir durante la construcción de edificaciones (UIS, 2006).

A su vez, en la Universidad de los Andes se cuenta dos mesas vibratorias cuadradas unidireccionales (20,25 m² y 1 m²), con una capacidad de 50 toneladas y 5 toneladas respectivamente. Las investigaciones realizadas en estos equipos tienen como objetivo medir la respuesta de una estructura ante perturbaciones dinámicas, mediante la adquisición de datos durante el experimento, simulando intensidades de sismos hasta de 8 grados en escala de Richter (UniAndes, 2013).

En Colombia, la mesa sísmica más grande se encuentra construida en la Universidad EAFIT, cuenta con una capacidad para soportar cargas verticales hasta de 70 toneladas y tiene una dimensión cuadrada (36 m²). La universidad destaca la importancia de este tipo de inventos, debido a la necesidad que presenta Colombia al ser tan vulnerable a temblores de tierra por sus condiciones geográficas, concluyen que los estudios que han realizado hasta ahora han sido satisfactorios y han permitido realizar sistemas constructivos más eficientes (Universidad EAFIT). Este tipo de construcción es un modelo que seguir, debido a que no solo representaría un logro para la Universidad, sino que le permitiría a la ciudad de Ibagué estar a la vanguardia frente a investigaciones sísmicas.

2.4.4 Mesa sísmica Universidad Nacional de Colombia sede Manizales

La mesa sísmica de la universidad Nacional de Colombia Sede Manizales tiene una plataforma de 2450 mm x 2450 mm, la cual se componen por un actuador dinámico de 100 kN, con capacidad de peso para los modelos de 1 Tonelada neta, también permite un desplazamiento de más o menos 200 mm, un rango de frecuencia 1 a 50 Hz y 1 g de aceleración aproximado. Para la caracterización de los modelos estructurales con sismos de Ibagué se implementó la mesa sísmica del laboratorio de Estructuras de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales la cual tiene la capacidad de simular señales de sismos ocurridos o señales aleatorias.

Figura 2–12: Mesa Sísmica Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales.



Fuente: el Autor

2.5 Acerca de la Ciudad de Ibagué

Para el desarrollo de la presente investigación se realizó un trabajo de campo en la ciudad de Ibagué con la finalidad de identificar edificaciones de diferente altura y uso. Ibagué es un municipio ubicado en el centro-occidente de Colombia, sobre la Cordillera Central de los Andes entre el Cañón del Combeima y el Valle del Magdalena, en cercanías del Nevado del Tolima. Es la capital del departamento de Tolima. Se encuentra a una altitud de 1285 msnm; Fue fundada el 14 de octubre de 1550 por el capitán español Andrés López de Galarza, lo que la convierte en una de las ciudades más antiguas de América. Por ser una ciudad capital, alberga la Gobernación del Tolima, el Palacio de Justicia, el Palacio Municipal, la Asamblea Departamental, la fiscalía general de la Nación, y es el principal epicentro político, industrial, comercial, cultural, financiero y turístico del departamento. (www.Tolima.gov).

Figura 2–13: Mapa de la Ciudad de Ibagué.

Fuente: el Autor

La ciudad de Ibagué ha presentado en los últimos años un crecimiento significativo en infraestructura, estas obras no solo son un reflejo del desarrollo y el crecimiento económico de la ‘Capital Musical’, sino que además han cambiado el paisaje urbano y mostrado la cara del futuro. (www.elnuevodia.com.co/cambiosenlainfraestructuradeibague).

Figura 2–14: Vista de algunos edificios en la Ciudad de Ibagué, Tolima

Fuente: el Autor

2.5.1 Edificaciones en la Ciudad de Ibagué

El crecimiento en una ciudad permite marcar ciertos aspectos en algunas edificaciones que se pueden apreciar, donde se muestra un crecimiento en infraestructura en la última década teniendo como parámetros los tipos de uso que permiten generar desarrollo tal como residencia, colegios, Locales comerciales, hospitales y oficinas, las cuales se

encuentran descritas dentro del marco de la norma sismos resistente del 2010 en el título A como referente para el análisis del comportamiento sísmico para establecer su sistema estructural adecuado. Algunas de estas estructuras que se encuentran en la ciudad se pueden ver a continuación con una descripción general de lo visto de forma visual al realizar un recorrido por la Ciudad (www.Tolima.gov).

Figura 2–15: Institución Educativa Colegio Diego Fallón de 3 Pisos.



Fuente: el Autor

Figura 2–16: Institución educativa en construcción Colegio la Sagrada Familia de 3 Pisos.



Fuente. el Autor

Figura 2–17: Edificio residencial de 5 Pisos en centro de la Ciudad.



Fuente: el Autor

Figura 2–18: Institución educativa en construcción Colegio Arboleda Campestre de 3 Pisos.



Fuente: el Autor

Figura 2–19: Edificio de oficinas de servicio público de Gas Alcanos de 3 Pisos.



Fuente: el Autor

Figura 2–20: Institución educativa en construcción Colegio Normal Superior de 3 Pisos.



Fuente: el Autor

Figura 2–21: Edificio residencial de 5 Pisos en Barrio Belén.



Fuente: el Autor

A partir de este trabajo de campo se propuso la construcción de los modelos estructurales para la caracterización de las estructuras mediante simulación de sismos de Ibagué en mesa sísmica. Los modelos investigados tienen un uso residencial, comercial y educativo. Por tanto, como se observó en la ciudad el incremento de este tipo de estructuras hace importante generar un estudio que permita conocer cuáles son las características que puede presentar un edificio en Ibagué con las condiciones de diseño actuales dadas por el reglamento sismo resistente NSR 10.

3. Diseño de la metodología de investigación

El desarrollo del estudio se efectuó en varias etapas, a través de las cuales se pudo ejecutar todo el análisis de los modelos estructurales seleccionados de acuerdo con la muestra en la ciudad de Ibagué. Cada una de las etapas se especifica a continuación:

3.1 Recolección de información

En esta etapa se consultó la documentación acerca del comportamiento dinámico de la ciudad, se revisaron artículos de investigación, trabajos de grado, libros de análisis dinámico y se estableció que se trabajarían señales Locales de acuerdo con espectros generados en la microzonificación sísmica de Ibagué, adicional se usaron una señal Nacional y dos Internacionales para estudiar el comportamiento de edificios de la ciudad de Ibagué. Así mismo se definió el análisis modal tiempo-historia como el eje central de las pruebas, siendo así una metodología de descomposición en el dominio de las frecuencias la que se aplicaría para el análisis.

Añadido a esto, se encontró un estudio de microzonificación sísmica de la ciudad de Ibagué efectuada por la alcaldía municipal de Ibagué y el Centro de Estudios Sobre Desastres y Riesgos (CEDERI), en el cual se especificaba información referente a la actividad sísmica relevante y fuentes sismogénicas, tales como su ubicación, algunas propiedades como la aceleración y espectros de respuesta.

3.1.1 Características geológicas del terreno

Para los parámetros de suelo se tienen como parámetros los recolectados mediante la microzonificación sísmica y el Mapa de Aptitud Urbanística de la Curaduría No 2. Según la tabla A.2.4-2 del NSR-10, se puede considerar como perfil de suelo:

Figura 3–1: Características del suelo.



Fuente: Mapa de aptitud Urbanística de Ibagué

Según las características geológicas y geotécnicas de la zona se puede decir que tenemos un suelo en su mayoría limo areno arcilloso, el cual se puede considerar como tipo D de acuerdo con la Norma NSR 10.

Una de las características principales de la Estación en la cual se registran los sismos es la geología, la cual se divide en dos: suelo o roca; esto nos restringe para tener en cuenta los sismos registrados en suelo, además las estaciones que se encuentran en Ibagué (Ibagué SGC y Ibagué Champagnat) son en suelo.

3.2 Selección de los modelos estructurales

En esta etapa se muestran los edificios estructurales seleccionados a través de planos donde se puede visualizar su geometría, configuración estructural y propiedades mecánicas, los cuales serán representados por modelos estructurales que caracterizan su comportamiento en la mesa sísmica con sismos de Ibagué.

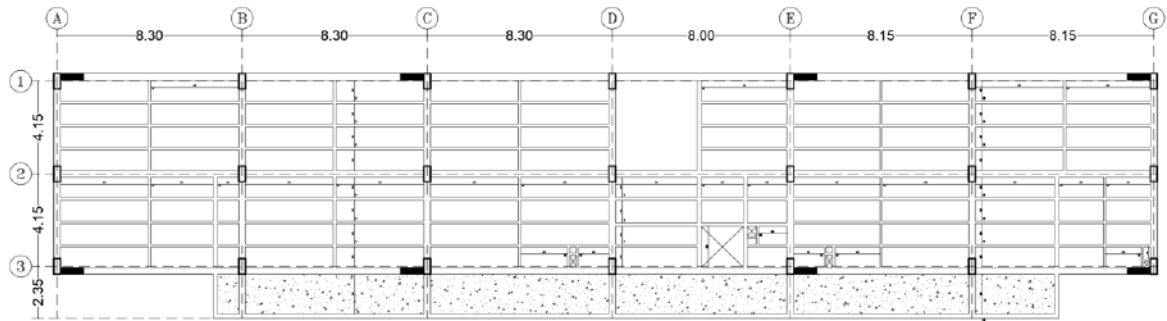
Para la investigación se ajustaron parámetros de configuración estructural, materiales y altura para determinar propiedades dinámicas que se permitan replicar en la mesa sísmica al momento de generar modelos reducidos a escala, teniendo como referencia los datos expuestos en la normativa vigente NSR 10. Los modelos seleccionados son tres (3), cada uno de los modelos seleccionados se ajustaron para cumplir derivas, periodos de vibración y parámetros de diseño.

Se generaron modelos digitales de las estructuras de diseño, la cuales se analizaron con la ayuda del programa ETABS (anexo 3). A continuación, se muestran los modelos con sus respectivos datos de análisis:

3.2.1 Estructura de uso III – institucional educativo de 3 pisos

El edificio corresponde a una estructura destinada a uso educativo institucional de 3 pisos. El sistema estructural seleccionado para carga vertical y de resistencia sísmica se clasifica como Pórticos de Concreto Resistente a Momentos con capacidad moderada de disipación de Energía, el sistema de cubierta será una placa maciza apoyada sobre vigas de concreto.

Figura 3–2: Planta del edificio de diseño de la institución educativa de 3 pisos (unidades en metros).



Fuente: el Autor

La tabla 3-1 muestra la información referente al espectro de diseño utilizado para el edificio seleccionado para el diseño de la institución educativa de 3 pisos.

Tabla 3–1: Información considerada en el espectro de diseño para la institución educativa de 3 pisos.

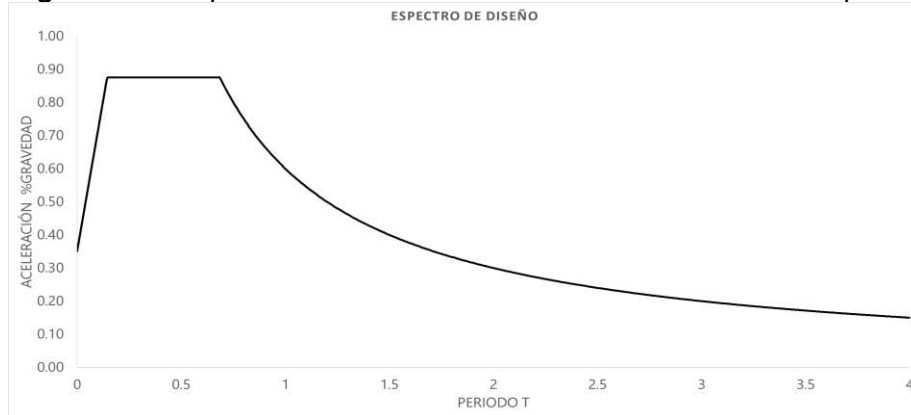
Datos del Espectro de Diseño para la institución educativa de 3 pisos	
Amenaza sísmica (Aa)	0.2
Velocidad Pico efectiva (Av)	0.2
Tipo de perfil de suelo	D
Coeficiente de amplificación (Fa)	1.4
Coeficiente de amplificación (Fv)	2
Grupo de Uso	III
Coeficiente de importancia (I)	1.25
Coeficiente para calcular el período (Ct)	0.047

Exponente para calcular el período (a)	0.9
Número de Pisos de la edificación	3
Altura típica de entrepiso (h_i)	3.6 m
Altura Total del edificio (h_n)	10.8 m
Período aproximado de la estructura	0.4 s
Período en zona de transición (T_c)	0.6857 s
Período largo (TL)	4.8 s
Espectro de Diseño (S_a)	0.875 %g

Fuente: el Autor

Con la información del espectro de diseño mostrada en la Tabla 3-1, en la Figura 3-3 se muestra la gráfica del espectro de diseño de la institución educativa de 3 pisos donde se muestra la aceleración en términos de porcentaje de la gravedad con respecto al periodo.

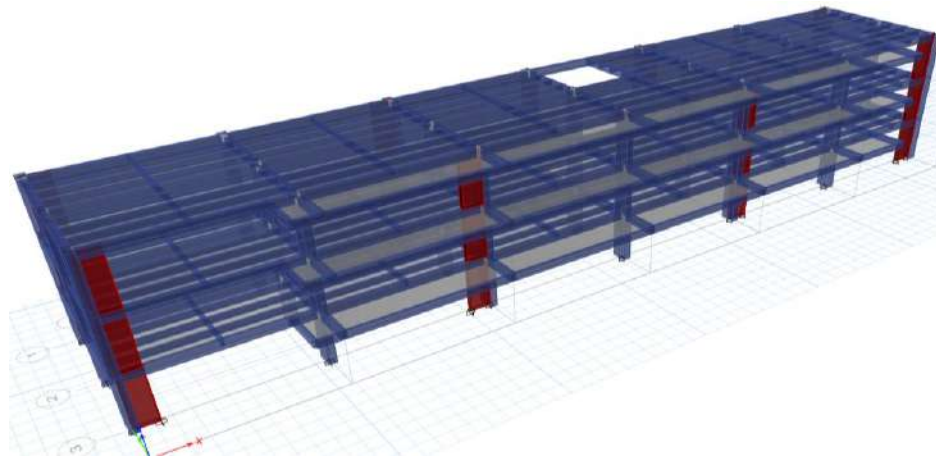
Figura 3-3: Espectro de diseño de la institución educativa de 3 pisos.



Fuente: el Autor

En la figura 3-4 se muestra un modelo tridimensional del diseño de la institución educativa de 3 pisos.

Figura 3–4: Modelo Digital Institución educativa de 3 pisos



Fuente: el Autor

En la tabla 3-2 se muestran los datos de las derivas de acuerdo con el caso de carga y a su dirección de acuerdo con los requisitos expuestos en la norma sismo resistente del 2010.

Tabla 3–2: Derivas de piso del edificio de diseño correspondiente a la institución educativa de 3 pisos.

Derivas de Piso Institución educativa de 3 pisos				
Piso	Caso de Carga	Eje	Deriva	%Deriva
3	Sismo en X	X	0.00633	0.6333
3	Sismo en X	X	0.00642	0.6415
3	Sismo en Y	Y	0.00687	0.6867
2	Sismo en X	X	0.00623	0.6231
2	Sismo en Y	Y	0.00801	0.8007
1	Sismo en X	X	0.00306	0.3056
1	Sismo en Y	Y	0.00467	0.4672

Fuente: el Autor

En la tabla 3-3 se muestran los periodos y frecuencias de acuerdo con el caso de carga tomados del análisis dinámico.

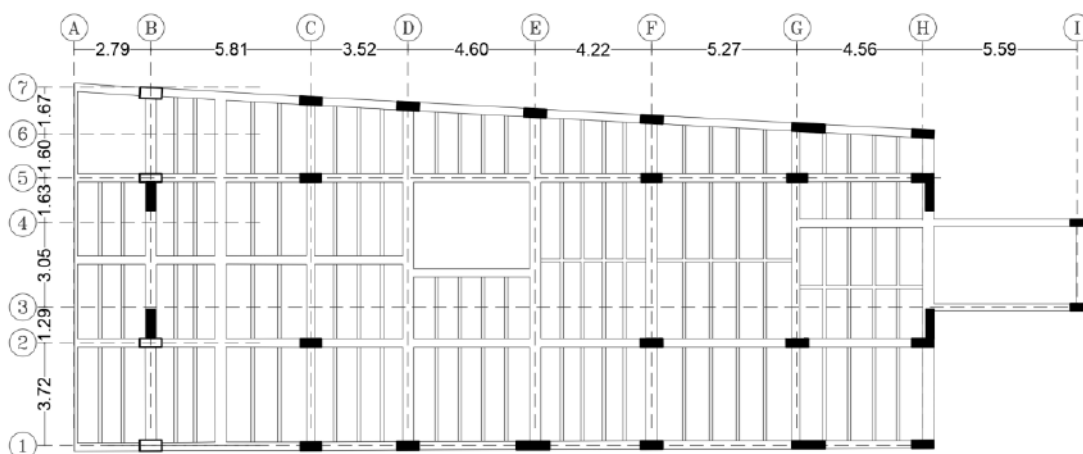
Tabla 3–3: Periodos y Frecuencias del edificio de diseño institución educativa de 3 pisos.

Periodos y frecuencias de la institución educativa 3 pisos				
Caso	Modo	Periodo	Frecuencia	Frecuencia Circular
		s	ciclo/s	rad/s
Modal	1	0.402	2.487	15.6285
Modal	2	0.391	2.56	16.0824
Modal	3	0.35	2.858	17.9602

Fuente: el Autor

3.2.2 Estructura de uso II – oficinas y locales comerciales de 3 pisos

El edificio corresponde a una estructura destinada a uso de oficinas y locales comerciales de 3 pisos. El sistema estructural seleccionado para carga vertical y de resistencia sísmica se clasifica como Pórticos de Concreto Resistente a Momentos con capacidad moderada de disipación de Energía, el sistema de cubierta será una placa maciza apoyada sobre vigas de concreto.

Figura 3–5: Planta del edificio de diseño de las oficinas y locales comerciales de 3 pisos (unidades en metros).

Fuente: el Autor

La tabla 3-4 muestra la información referente al espectro de diseño utilizado para el edificio seleccionado para el diseño de las oficinas y locales comerciales de 3 pisos.

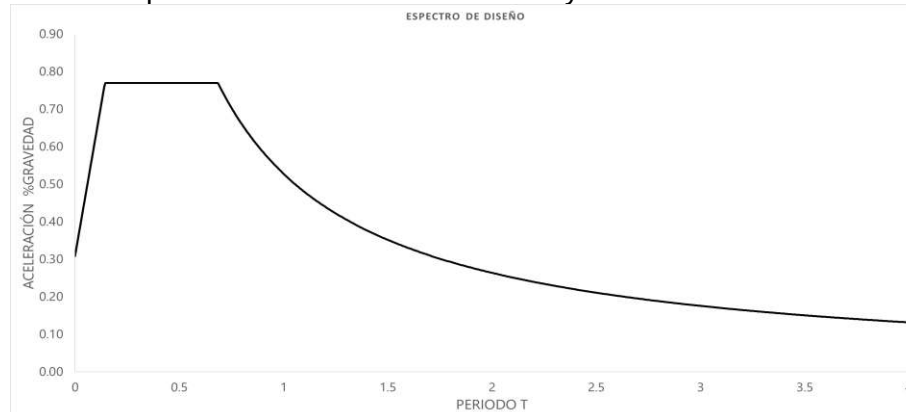
Tabla 3–4: Información considerada en el espectro de diseño para las oficinas y locales comerciales de 3 pisos.

Datos del Espectro de Diseño para las oficinas y locales comerciales	
Amenaza sísmica (Aa)	0.2
Velocidad Pico efectiva (Av)	0.2
Tipo de perfil de suelo	D
Coeficiente de amplificación (Fa)	1.4
Coeficiente de amplificación (Fv)	2
Grupo de Uso	II
Coeficiente de importancia (I)	1.10
Coeficiente para calcular el período (Ct)	0.047
Exponente para calcular el período (a)	0.9
Número de Pisos de la edificación	3
Altura típica de entrepiso (hi)	3.9 m
Altura Total del edificio (hn)	11.7 m
Período aproximado de la estructura	0.43 s
Período en zona de transición (Tc)	0.6857 s
Período largo (TL)	4.8 s
Espectro de Diseño (Sa)	0.77 %g

Fuente: el Autor

Con la información del espectro de diseño en la Figura 3-6 se muestra la gráfica del espectro de diseño para las oficinas y locales comerciales de 3 pisos donde se muestra la aceleración en términos de porcentaje de la gravedad con respecto al periodo.

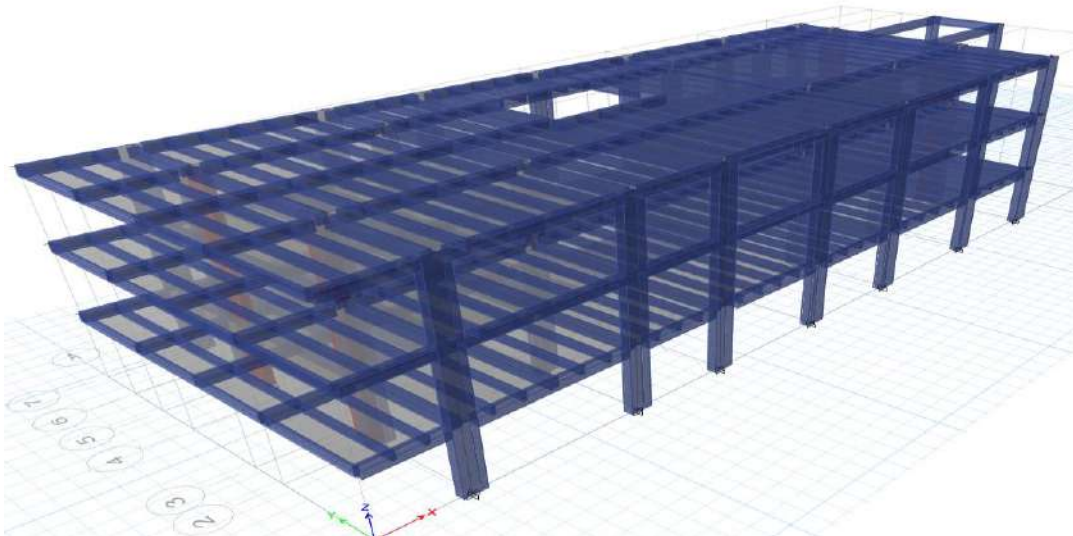
Figura 3–6: Espectro de diseño de las oficinas y locales comerciales de 3 pisos.



Fuente: el Autor

En la figura 3-7 se muestra un modelo tridimensional del diseño de las oficinas y locales comerciales de 3 pisos.

Figura 3–7: Modelo Digital Oficinas y locales comerciales de 3 pisos



Fuente: el Autor

En la tabla 3-5 se muestran los datos de las derivas de acuerdo con el caso de carga y a su dirección de acuerdo con los requisitos expuestos en la norma sismo resistente del 2010.

Tabla 3–5: Derivas de piso del edificio de diseño correspondiente a oficinas y locales comerciales de 3 pisos.

Derivas de Piso Edificio Oficinas y locales 3 Pisos				
Piso	Caso de Carga	Eje	Deriva	%Deriva
3	Sismo en X	X	0.00505	0.5049
3	Sismo en Y	Y	0.00738	0.7377
2	Sismo en X	X	0.00644	0.6443
2	Sismo en Y	Y	0.00909	0.9094
1	Sismo en X	X	0.00405	0.4048
1	Sismo en Y	Y	0.00585	0.5851

Fuente: el Autor

En la tabla 3-6 se muestran los periodos y frecuencias de acuerdo con el caso de carga tomados del análisis dinámico.

Tabla 3–6: Periodos y Frecuencias del edificio de diseño oficinas y locales comerciales de 3 pisos.

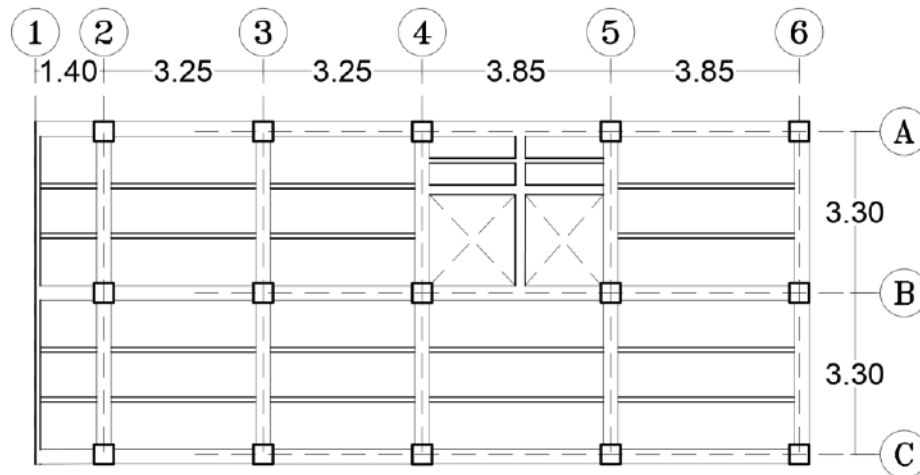
Periodo y Frecuencias Oficinas y Locales Comerciales				
Caso	Modo	Periodo	Frecuencia	Frecuencia circular
		s	ciclo/s	rad/s
Modal	1	0.479	2.089	13.124
Modal	2	0.422	2.372	14.90
Modal	3	0.343	2.917	18.13

Fuente: el Autor

3.2.3 Estructura de uso I – residencial de 5 pisos

El edificio para construcción nueva corresponde al diseño estructural residencial de 5 pisos. El sistema estructural seleccionado para carga vertical y de resistencia sísmica se clasifica como Pórticos de Concreto Resistente a Momentos con capacidad moderada de disipación de Energía, el sistema de cubierta será una placa maciza apoyada sobre vigas de concreto.

Figura 3–8: Planta del edificio de diseño residencial de 5 pisos (unidades en metros).



Fuente: el Autor

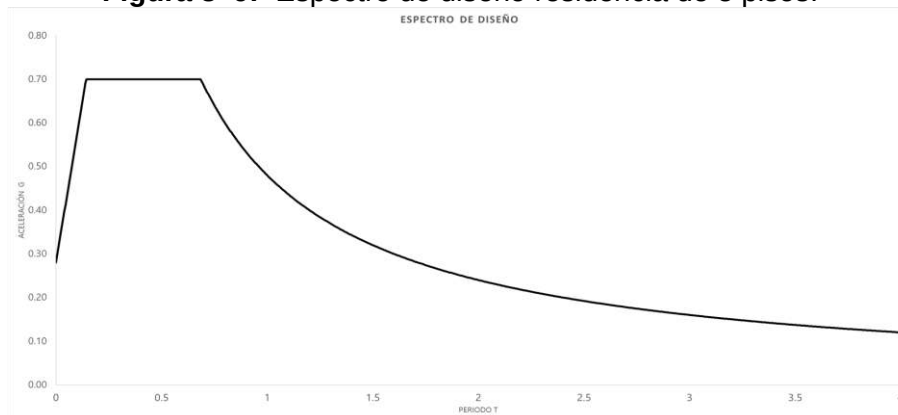
La tabla 3-7: muestra la información referente al espectro de diseño utilizado para el edificio seleccionado para el diseño residencial de 5 pisos.

Datos del Espectro de Diseño para la residencia de 5 pisos	
Amenaza sísmica (Aa)	0.2
Velocidad Pico efectiva (Av)	0.2
Tipo de perfil de suelo	D
Coeficiente de amplificación (Fa)	1.4
Coeficiente de amplificación (Fv)	2
Grupo de Uso	I
Coeficiente de importancia (I)	1.00
Coeficiente para calcular el período (Ct)	0.047
Exponente para calcular el período (a)	0.9
Número de Pisos de la edificación	5
Altura típica de entrepiso (hi)	2.8 m
Altura Total del edificio (hn)	14 m
Período aproximado de la estructura	0.505 s
Período en zona de transición (Tc)	0.6857 s
Período largo (TL)	4.8 s
Espectro de Diseño (Sa)	0.7 %g

Fuente: el Autor

Con la información del espectro de diseño en la Figura 3-9 se muestra la gráfica del espectro de diseño para la residencia de 5 pisos donde se muestra la aceleración en términos de porcentaje de la gravedad con respecto al periodo.

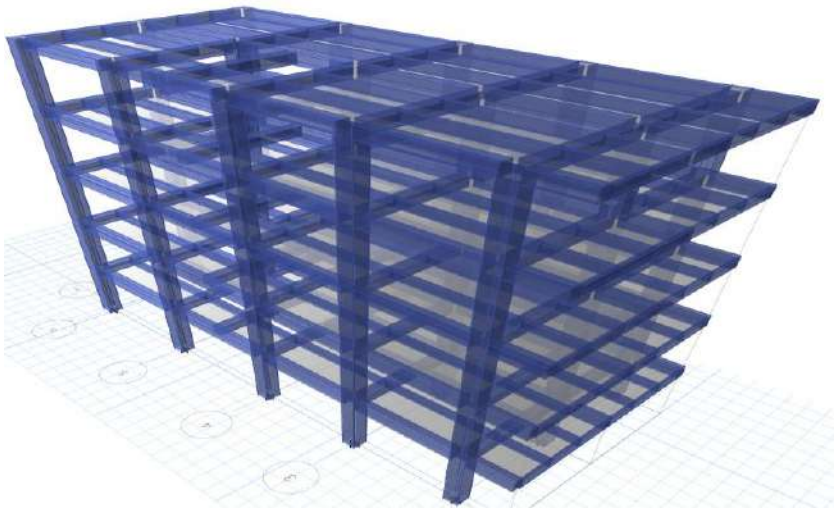
Figura 3–9: Espectro de diseño residencia de 5 pisos.



Fuente: el Autor

En la figura 3-10 se muestra un modelo tridimensional del diseño residencial de 5 pisos.

Figura 3–10: Modelo Digital Residencial de 5 pisos



Fuente: el Autor

En la tabla 3-8 se muestran los datos de las derivas de acuerdo con el caso de carga y a su dirección de acuerdo con los requisitos expuestos en la norma sismo resistente del 2010.

Tabla 3–7: Derivas de piso del edificio de diseño correspondiente a residencial de 5 pisos.

Derivas de Piso Residencia de 5 pisos				
Piso	Caso de Carga	Eje	Deriva	%Deriva
Story5	Sismo X	X	0.00315	0.3153
Story5	Sismo Y	Y	0.00259	0.2587
Story4	Sismo X	X	0.00537	0.5371
Story4	Sismo Y	Y	0.0046	0.4597
Story3	Sismo X	X	0.00714	0.7137
Story3	Sismo Y	Y	0.00622	0.6223
Story2	Sismo X	X	0.00783	0.7828
Story2	Sismo Y	Y	0.00696	0.6964
Story1	Sismo X	X	0.00511	0.5105

Fuente: el Autor

En la tabla 3-8 se muestran los periodos y frecuencias de acuerdo con el caso de carga tomados del análisis dinámico.

Tabla 3–8: Periodos y Frecuencias del edificio Residencial de 5 pisos.

Periodo y Frecuencias Residencia de 5 pisos				
Caso	Modo	Periodo	Frecuencia	Frecuencia circular
		s	ciclo/s	rad/s
Modal	1	0.513	1.951	12.2573
Modal	2	0.497	2.011	12.6383
Modal	3	0.454	2.205	13.8541

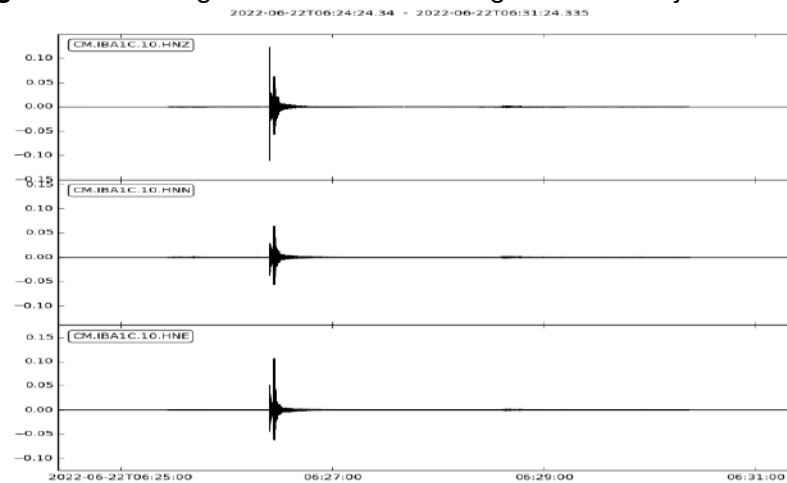
Fuente: el Autor

3.3 Recolección de datos

En esta fase de la investigación se definió el proceso de obtención de datos mediante una revisión de catálogos de acelerogramas de sismos ocurridos que son considerados representativos y pertinentes para el comportamiento dinámico de la ciudad de Ibagué. Sin embargo, la información es bastante insuficiente por lo cual se tomaron datos de los espectros de respuesta generados en la microzonificación existente. A partir del análisis de la información se generaron 5 sismos sintéticos a partir de 5 espectros de respuesta diferentes que representan la amenaza en distintos sectores de la ciudad de Ibagué. También se utilizan sismos escalados de acuerdo con la ASCE 7- 22 partiendo de 3 sismos sintéticos para obtener datos de la respuesta esperada de Ibagué, para representar la amenaza nacional se utiliza el sismo de Armenia y su máximo esperado, y adicional se prueba el sismo del Ecuador el cual tuvo influencia en Colombia y por último el sismo de Bolu – Turquía con finalidad experimental. Para generar la respuesta de aceleración de los sismos sintéticos se tiene en cuenta los siguientes parámetros:

3.3.1 Magnitud y registro

Los sismos de los cuales se tiene registro en el Tolima son de una magnitud “Ligera” según la escala sismológica de Richter ya que no superan $ML=4.5$, pero bien se sabe que la probabilidad de que ocurra un sismo mucho más fuerte es alta teniendo como parámetros estadísticos el estudio de la microzonificación sísmica de Ibagué. Se tiene como señal base el sismo ocurrido el 22 de junio de 2022 en la ciudad de Ibagué:

Figura 3–11: Registro del sismo de Ibagué del 22 de junio de 2022

Fuente: Servicio geológico colombiano (SGC)

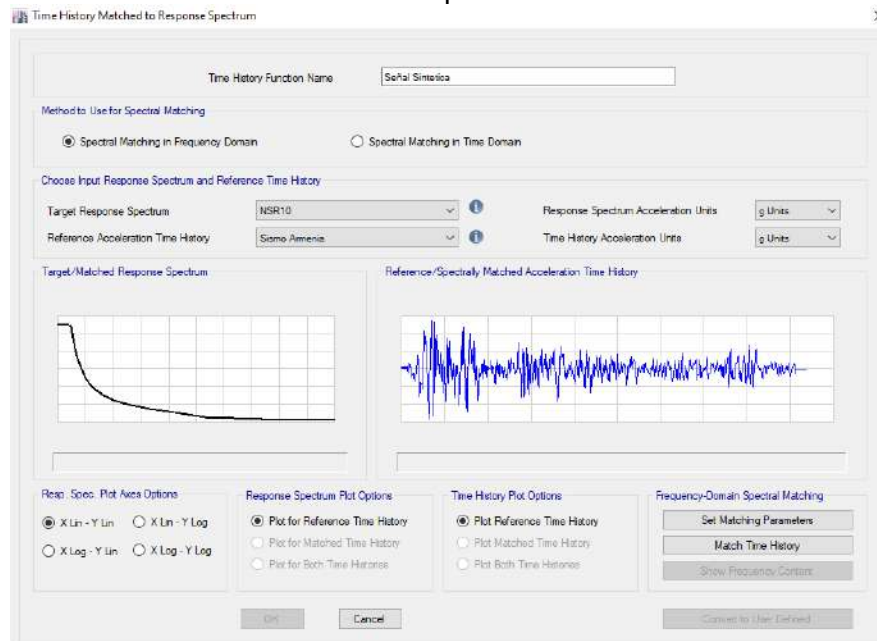
3.3.2 Acelerogramas de las señales sísmicas seleccionadas

Teniendo como parámetros los espectros de respuesta mostrados en la microzonificación de Ibagué se generan sismos sintéticos, se utiliza como base para generar el sismo sintético el sismo ocurrido el 22 de junio 2022 en la ciudad de Ibagué mostrado en la Figura 3-12.

A continuación, se muestran los espectros de respuesta y sus sismos sintéticos generados y tratados con un código generado en MATLAB para ingresarlos a la mesa sísmica. Para comprobar los sintéticos producidos se saca el espectro de respuesta en términos de aceleración y se compara con el que se encuentra en la microzonificación.

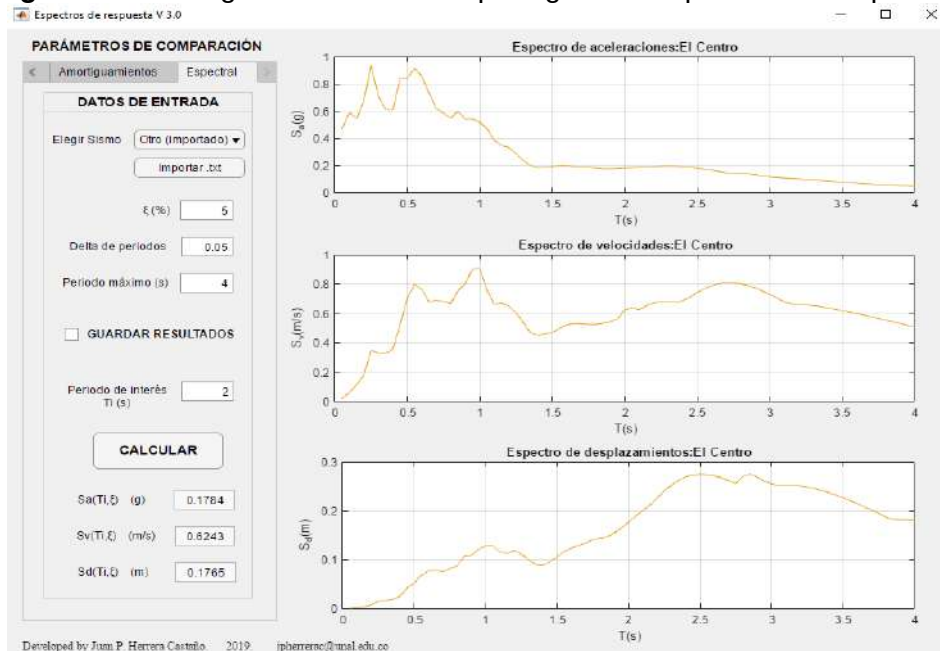
En la figura 3-13 se muestra el programa en MATLAB para generar espectros de respuestas a partir de señales de aceleración y en la figura 41 se muestra la extensión para generar sismos sintéticos a partir de un espectro de respuesta y una señal base.

Figura 3–12: Extensión de ETABS para generar señales sintéticas a partir de espectros de respuesta.



Fuente: ETABS versión de Prueba

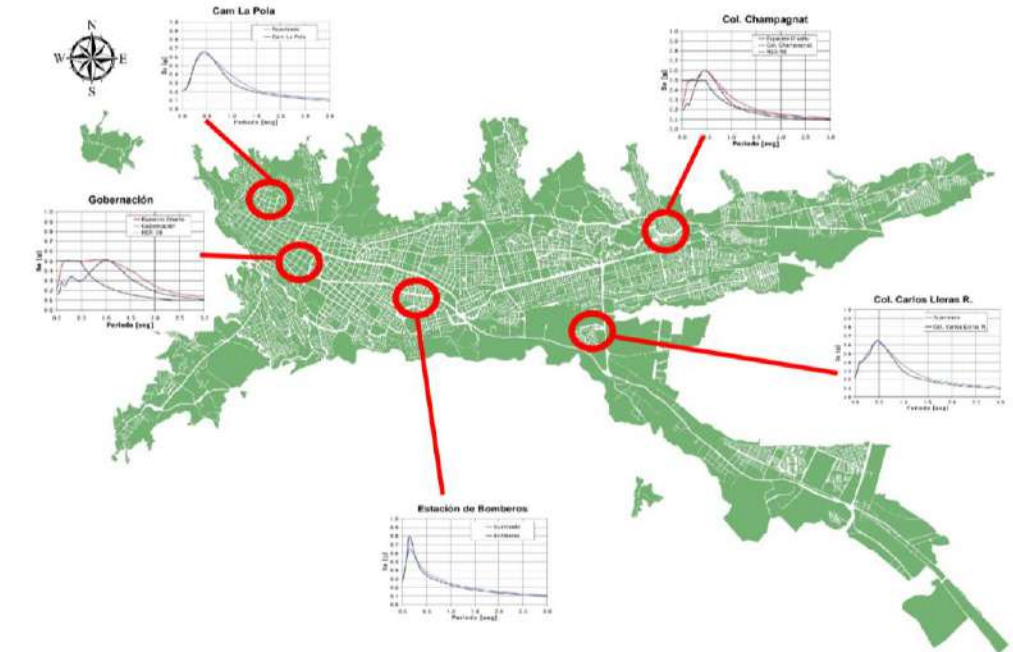
Figura 3–13: Programa en MATLAB para generar espectros de respuesta.



Fuente: Herrera Castaño, Juan Pablo

Los espectros seleccionados para representar la amenaza de la ciudad de Ibagué se muestran localizados en un mapa como se muestra en la figura 3-14, con la finalidad de evaluar la sismicidad en varios puntos colocando los edificios de diseño en la mesa.

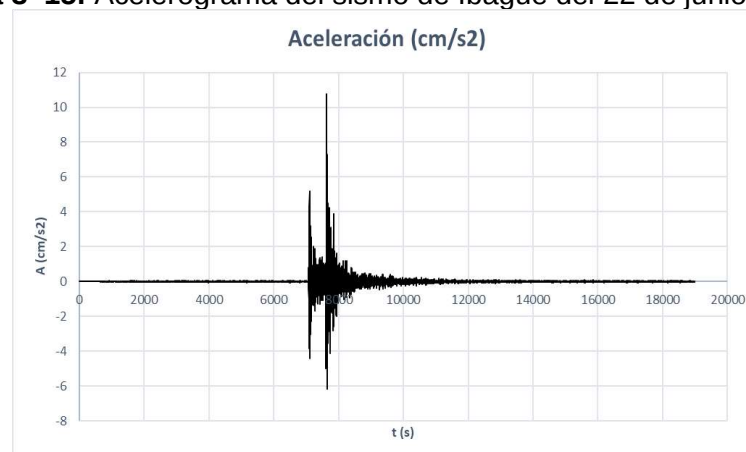
Figura 3–14: Mapa de localización de los espectros de amenaza de Ibagué



Fuente: el Autor

En la figura 3-15 se muestra el sismo ocurrido el 22 de junio del 2022 en la ciudad Ibagué, el cual fue utilizado como base para generar los sismos sintéticos de cada uno de los espectros seleccionados de la microzonificación sísmica mostrados en la figura 3-14.

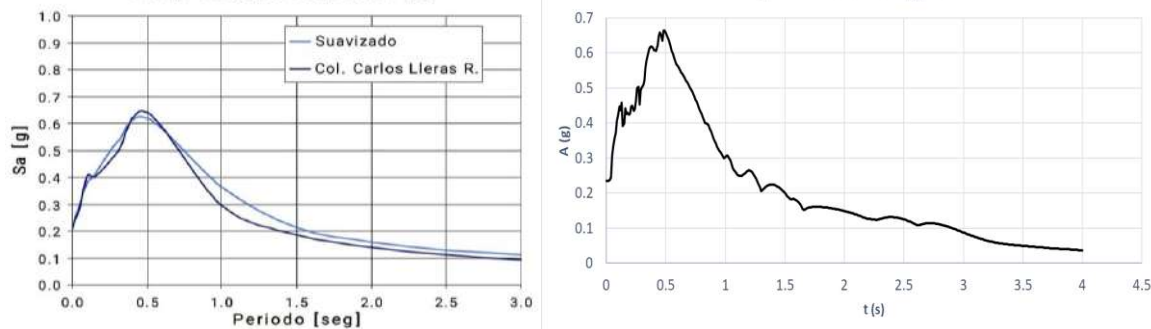
Figura 3–15: Acelerograma del sismo de Ibagué del 22 de junio de 2022



Fuente: Servicio Geológico Colombiano (SGC)

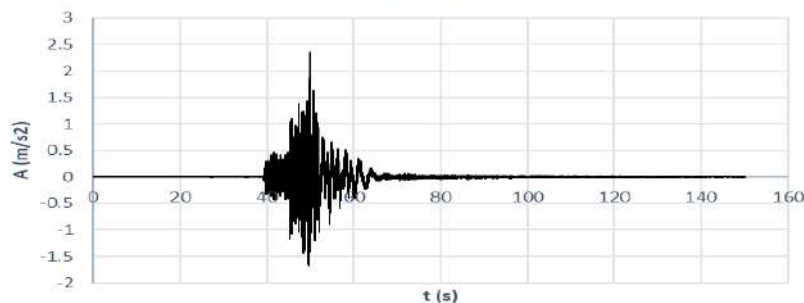
Se muestran a continuación cada uno de los registros sísmicos generados con su respectivo Espectro y su comprobación generando el espectro de la señal sintética obtenida:

Figura 3–16: Espectro de respuesta institución educativa Carlos Lleras Restrepo
Col. Carlos Lleras R.



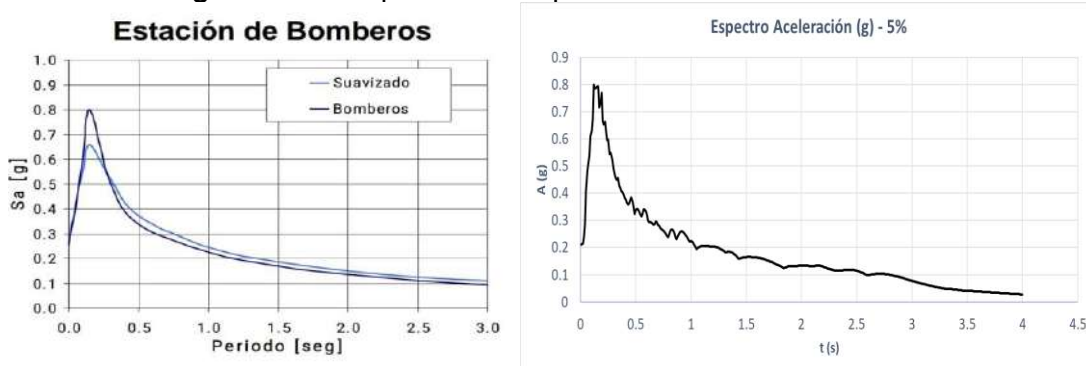
Fuente: el Autor

Figura 3–17: Señal sintética Col. Carlos Lleras R.
Aceleración m/s²

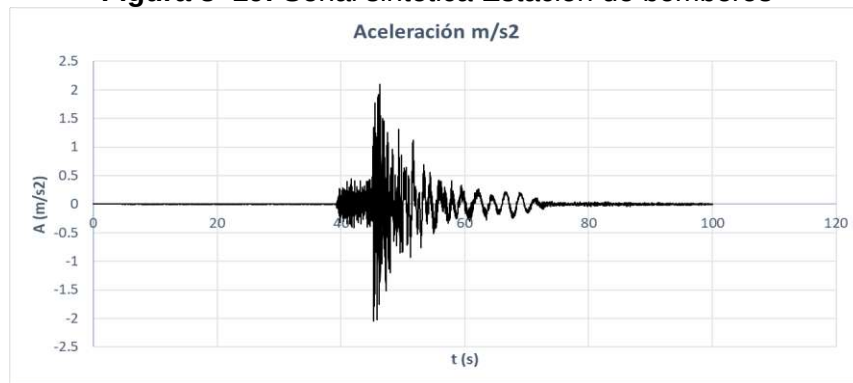


Fuente: el Autor

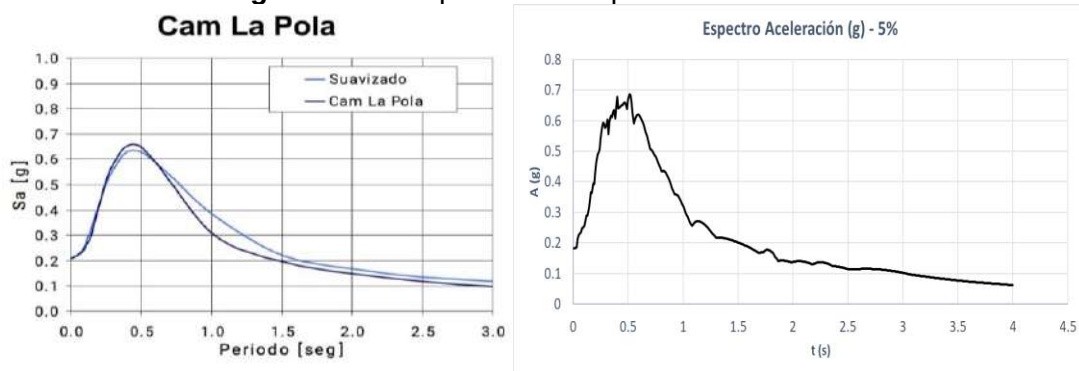
Figura 3–18: Espectro de respuesta Estación de bomberos



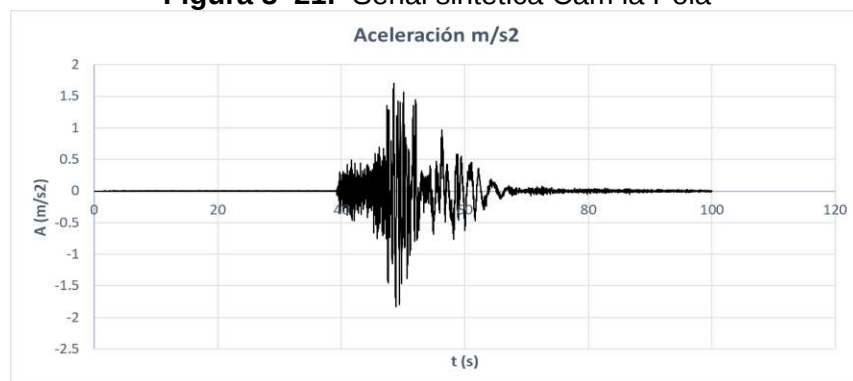
Fuente: el Autor

Figura 3–19: Señal sintética Estación de bomberos

Fuente: el Autor

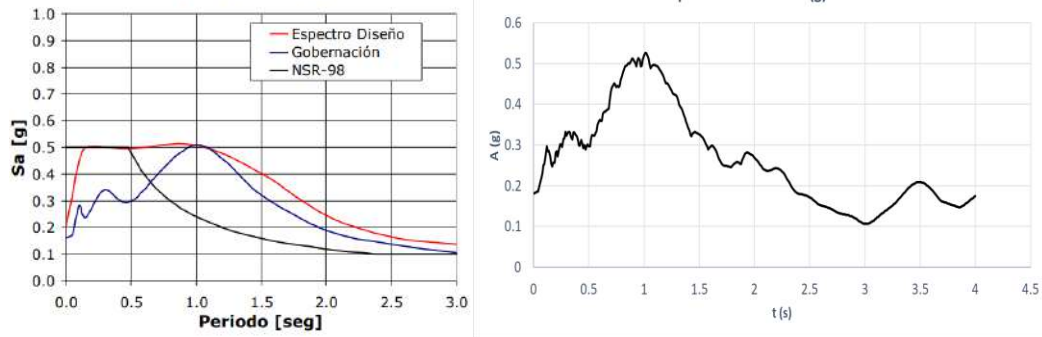
Figura 3–20: Espectro de respuesta Cam la Pola

Fuente: el Autor

Figura 3–21: Señal sintética Cam la Pola

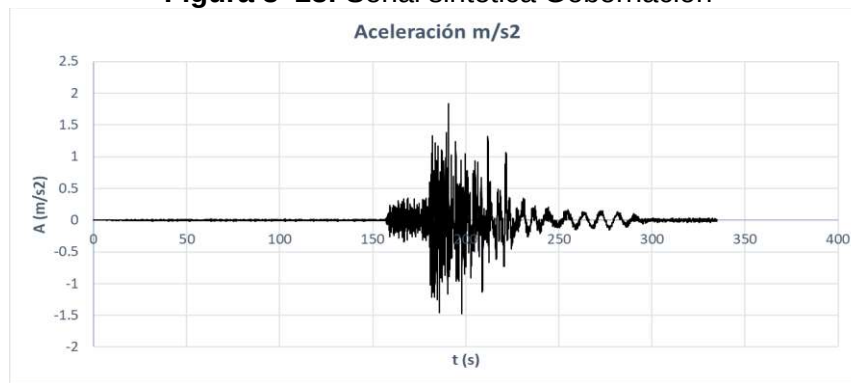
Fuente: el Autor

Figura 3–22: Espectro de respuesta Gobernación



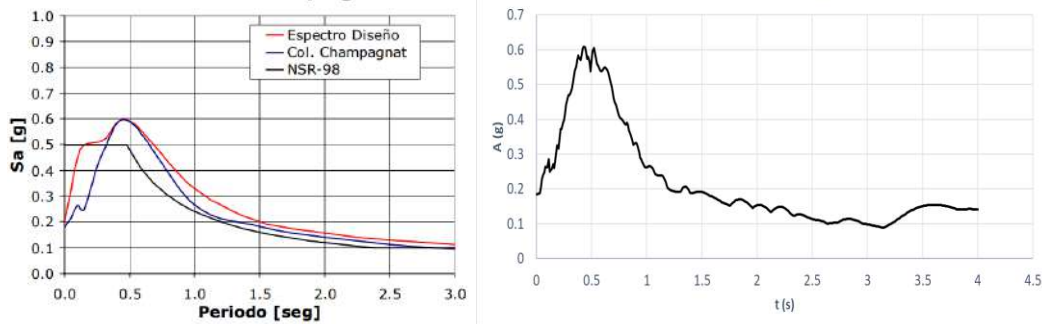
Fuente: el Autor

Figura 3–23: Señal sintética Gobernación

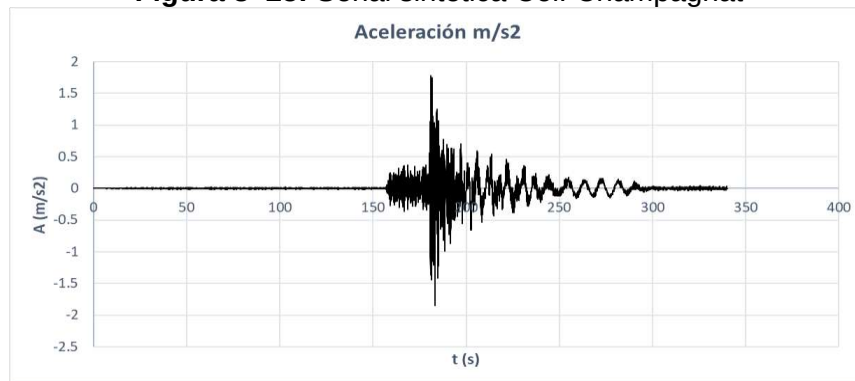


Fuente: el Autor

Figura 3–24: Espectro de respuesta Col. Champagnat



Fuente: el Autor

Figura 3–25: Señal sintética Col. Champagnat

Fuente: el Autor

3.3.3 Acelerogramas esperados de Ibagué según ASCE 7 - 22

Para representar de mejor forma la amenaza de la ciudad de Ibagué se tuvo en cuenta la actualización de la norma ASCE 7 – 22 por lo cual se seleccionaron tres sismos sintéticos de Ibagué correspondientes a Cam la Pola, Gobernación y Col. Champagnat, se les realizó el proceso de escalado a la amenaza correspondiente a cada grupo de uso de cada edificio de diseño. De acuerdo con ASCE 7 - 22 se toma un rango de periodos dependiendo del periodo natural del edificio del cual se pretende analizar el comportamiento dinámico. El factor de escala depende si el espectro de respuesta se encuentra por encima o por debajo del espectro de diseño del edificio.

Para el rango de periodo se tiene en cuenta las siguientes ecuaciones:

$$0.2 * T_n \quad y \quad 2.0 * T_n$$

Donde T_n es el periodo natural de la estructura

Para el factor de escala se considera la siguiente relación:

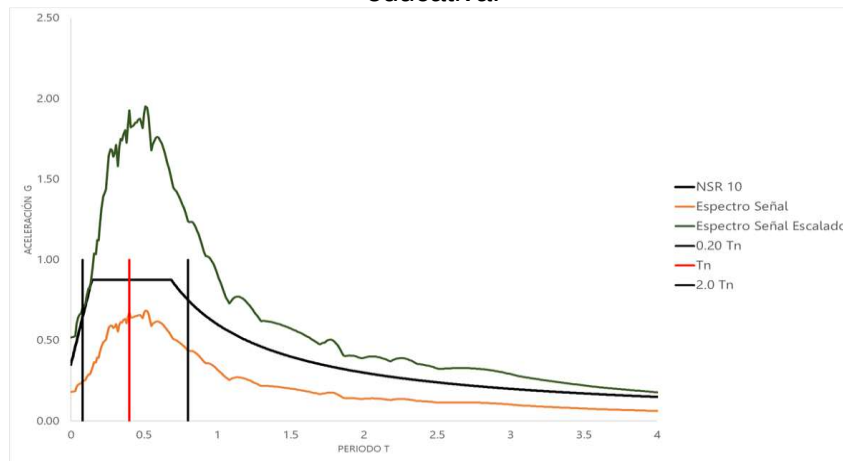
$$\text{Factor Multiplicador} = \frac{S_a \text{ Espectro de Diseño}}{S_a \text{ Espectro Señal Seleccionada}}$$

Para realizar el respectivo escalamiento de las señales se utilizan los espectros de diseño correspondientes a cada una de las edificaciones seleccionadas, se procede a ajustar los espectros de respuesta de los sismos seleccionados para llevarlos a la amenaza objetivo siguiendo los parámetros expuestos en la normativa ASCE 7 - 22.

Para el proceso de escalamiento se utiliza los espectros generados para cada una de las señales sintéticas mostradas en 4.3.1, también se utiliza los espectros de diseño de cada uno de los edificios seleccionados, estos factores de escala se muestran a continuación en una tabla donde se tiene presente la aceleración del punto más bajo con respecto a la aceleración del espectro de diseño en el mismo periodo objetivo dentro del rango de periodos establecido por la ASCE 7 – 22.

A continuación, se presentan cada uno de los espectros donde se muestra el espectro de diseño por NSR 10, el espectro de la señal seleccionada (CAM LA POLA, GOBERNACIÓN y COL. CHAMPAGNAT) y el espectro escalado con su respectivo factor y en el rango de periodos establecidos dependiendo del periodo natural para generar la amenaza probable a ocurrir.

Figura 3–26: Espectro escalado para el sismo de Ibagué Cam la Pola - institución educativa.



Fuente: el Autor

En la tabla 3-9 se muestra el factor de escala para la señal sintética generada para CAM LA POLA con el edificio correspondiente a institución educativa el cual se cataloga en un grupo de uso III.

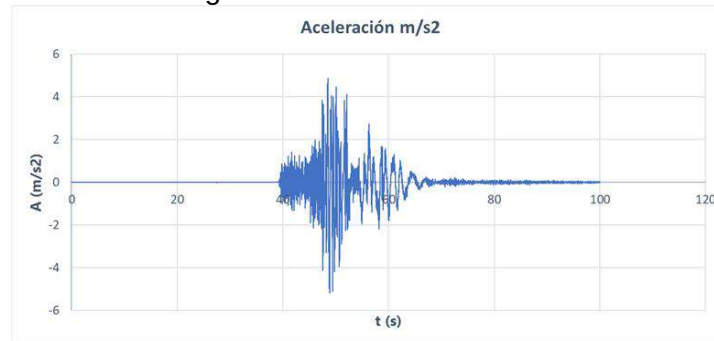
Tabla 3–9: Factor de Escala para el sismo Cam la Pola - Institución educativa

Factor de Escala	
$0.20T_n \sim 2.0T_n$	
periodo natural (T_n)	0.40 s
0.20 T_n	0.08 s
2.0 T_n	0.80 s

Sa	0.640 %g
Sa Señal	0.225 %g
Factor escala	<u>2.84</u>

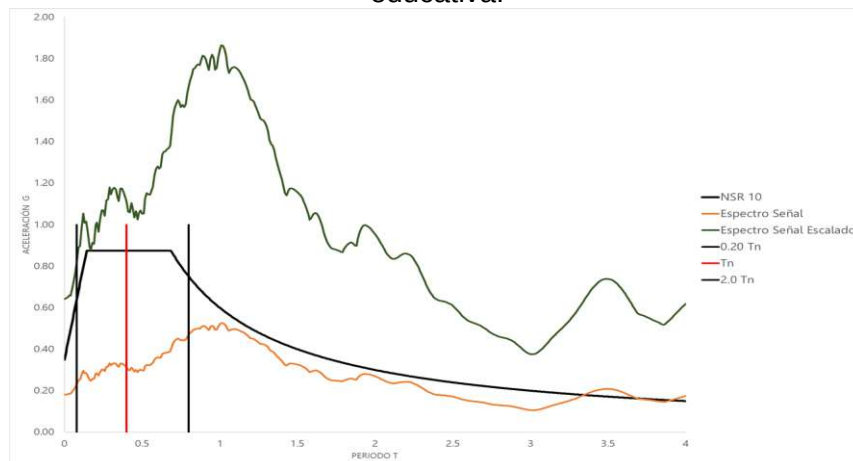
Fuente: el Autor

Figura 3–27: Sismo Ibagué Cam la Pola Escalado – Institución educativa



Fuente: el Autor

Figura 3–28: Espectro escalado para el sismo de Ibagué Gobernación - institución educativa.



Fuente: el Autor

En la tabla 3-10 se muestra el factor de escala para la señal sintética generada para GOBERNACIÓN con el edificio correspondiente a institución educativa el cual se cataloga en un grupo de uso III.

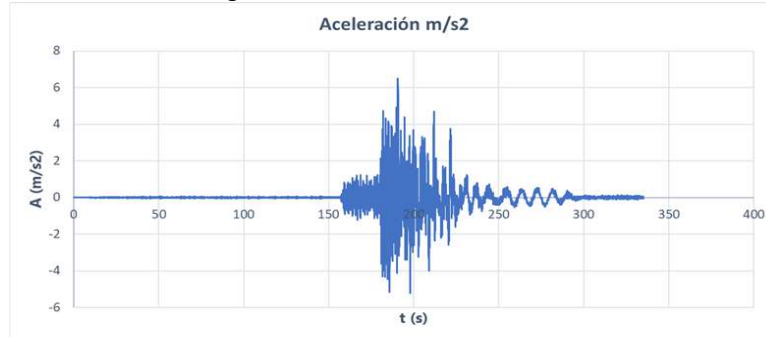
Tabla 3–10: Factor de Escala para el sismo Gobernación - Institución educativa

Factor de Escala	
0.20T _n -2.0T _n	
periodo natural (T _n)	0.400 s

0.20 Tn	0.080 s
2.0 Tn	0.80 s
Sa	0.645 %g
Sa Señal	0.182 %g
Factor escala	<u>3.54</u>

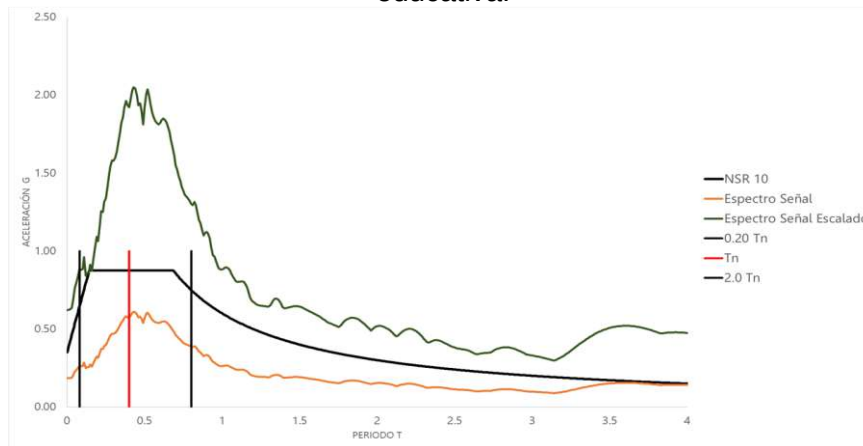
Fuente: el Autor

Figura 3–29: Sismo Ibagué Gobernación Escalado – Institución educativa



Fuente: el Autor

Figura 3–30: Espectro escalado para el sismo de Ibagué Col. Champagnat - institución educativa.



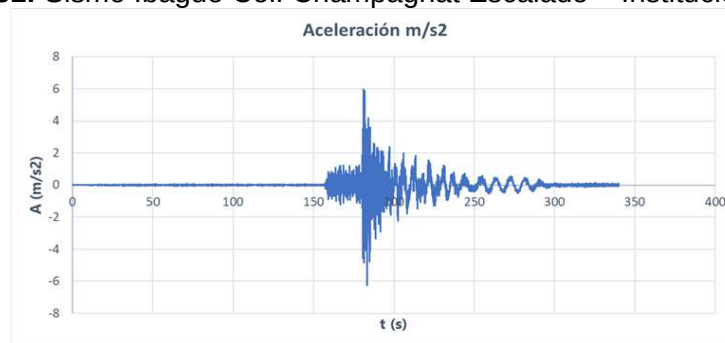
Fuente: el Autor

En la tabla 3-11 se muestra el factor de escala para la señal sintética generada para COL. CHAMPAGNAT con el edificio correspondiente a institución educativa el cual se cataloga en un grupo de uso III.

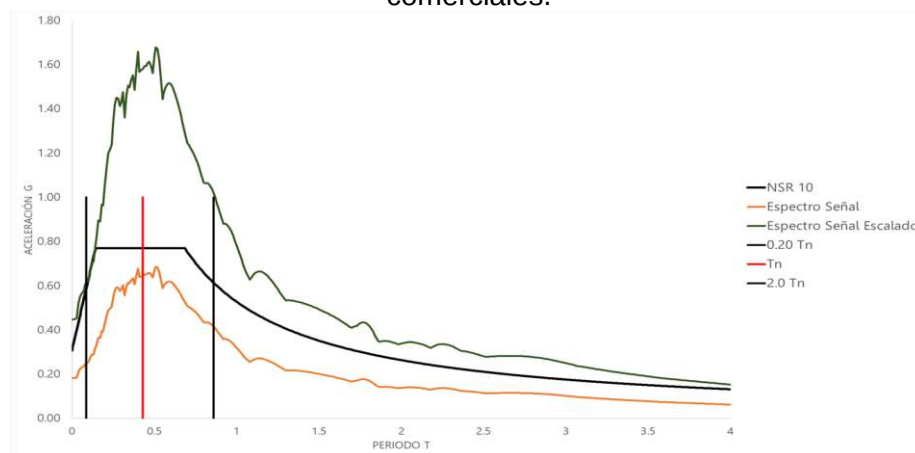
Tabla 3–11: Factor de Escala para el sismo Col. Champagnat - Institución educativa

Factor de Escala	
$0.20T_n-2.0T_n$	
periodo natural (T_n)	0.400 s
0.20 T_n	0.080 s
2.0 T_n	0.80 s
S_a	0.875 %g
S_a Señal	0.260 %g
Factor escala	<u>3.37</u>

Fuente: el Autor

Figura 3–31: Sismo Ibagué Col. Champagnat Escalado – Institución educativa

Fuente: el Autor

Figura 3–32: Espectro escalado para el sismo de Ibagué Cam la Pola – oficinas y locales comerciales.

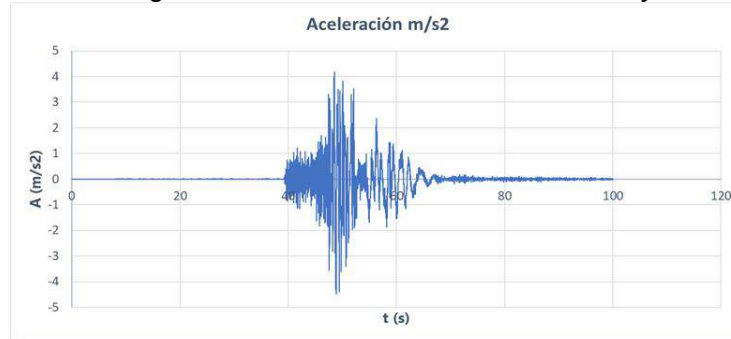
Fuente: el Autor

En la tabla 3-12 se muestra el factor de escala para la señal sintética generada para CAM LA POLA con el edificio correspondiente a Oficinas y locales comerciales el cual se cataloga en un grupo de uso II.

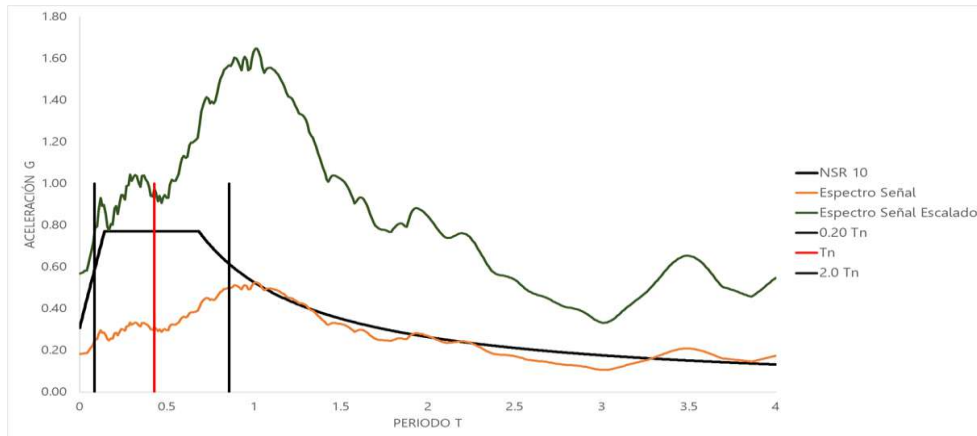
Tabla 3–12: Factor de Escala para el sismo Cam la Pola – Oficinas y Locales comerciales

Factor de Escala	
$0.20T_n \sim 2.0T_n$	
periodo natural (T_n)	0.430 s
0.20 T_n	0.086 s
2.0 T_n	0.86 s
Sa	0.600 %g
Sa Señal	0.245 %g
Factor escala	<u>2.45</u>

Fuente el Autor

Figura 3–33: Sismo Ibagué Cam la Pola Escalado – Oficinas y locales comerciales

Fuente: el Autor

Figura 3–34: Espectro escalado para el sismo de Ibagué Gobernación – oficinas y locales comerciales.

Fuente: el Autor

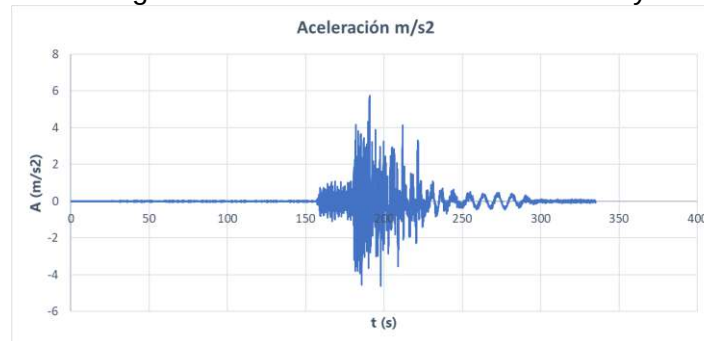
En la tabla 3-13 se muestra el factor de escala para la señal sintética generada para GOBERNACIÓN con el edificio correspondiente a Oficinas y locales comerciales el cual se cataloga en un grupo de uso II.

Tabla 3–13: Factor de Escala para el sismo Gobernación – Oficinas y Locales comerciales

Factor de Escala	
$0.20T_n-2.0T_n$	
periodo natural (T_n)	0.430 s
0.20 T_n	0.086 s
2.0 T_n	0.86 s
Sa	0.570 %g
Sa Señal	0.182 %g
Factor escala	<u>3.13</u>

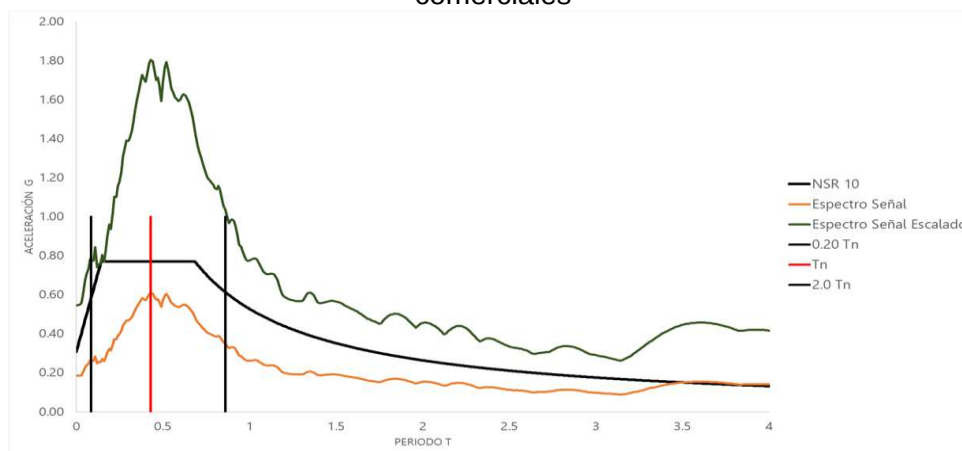
Fuente: el Autor

Figura 3–35: Sismo Ibagué Gobernación Escalado – Oficinas y locales comerciales



Fuente: el Autor

Figura 3–36: Factor de Escala para el sismo Col. Champagnat– Oficinas y Locales comerciales



Fuente: el Autor

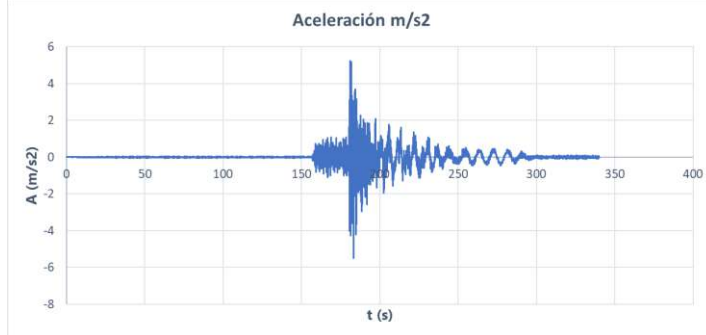
En la tabla 3-14 se muestra el factor de escala para la señal sintética generada para COL. CHAMPAGNAT con el edificio correspondiente a Oficinas y locales comerciales el cual se cataloga en un grupo de uso II.

Tabla 3–14: Factor de Escala para el sismo Col. Champagnat – Oficinas y Locales comerciales

Factor de Escala	
0.20Tn-2.0Tn	
periodo natural (Tn)	0.430 s
0.20 Tn	0.086 s
2.0 Tn	0.86 s
Sa	0.770 %g
Sa Señal	0.260 %g
Factor escala sc	2.96

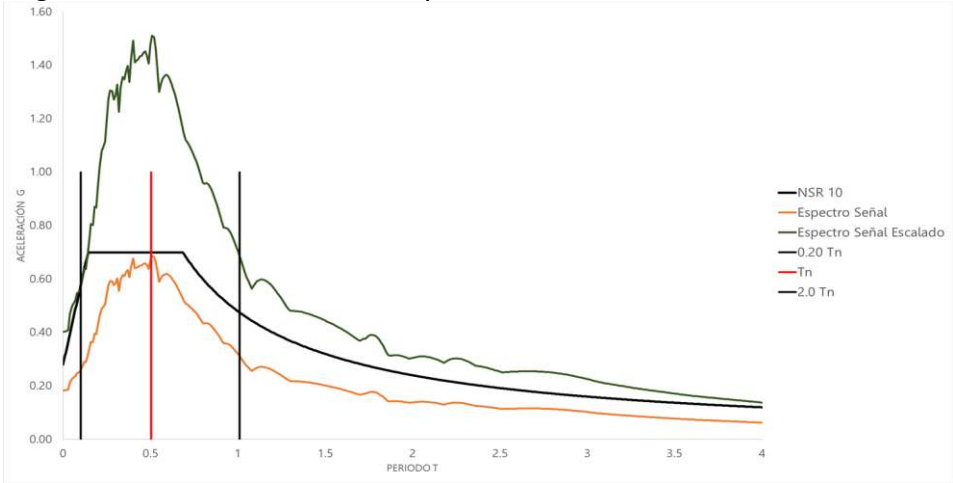
Fuente: el Autor

Figura 3–37: Sismo Ibagué Col. Champagnat Escalado – Oficinas y locales comerciales



Fuente: el Autor

Figura 3–38: Factor de Escala para el sismo Cam la Pola – Residencial



Fuente: el Autor

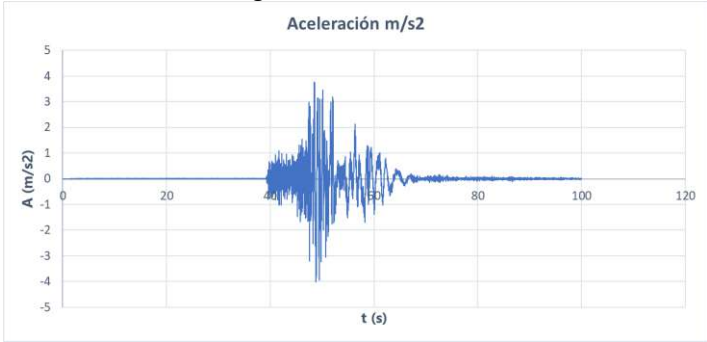
En la tabla 3-15 se muestra el factor de escala para la señal sintética generada para CAM LA POLA con el edificio correspondiente a Residencia bifamiliar el cual se cataloga en un grupo de uso I.

Tabla 3–15: Factor de Escala para el sismo Cam la Pola – Residencial

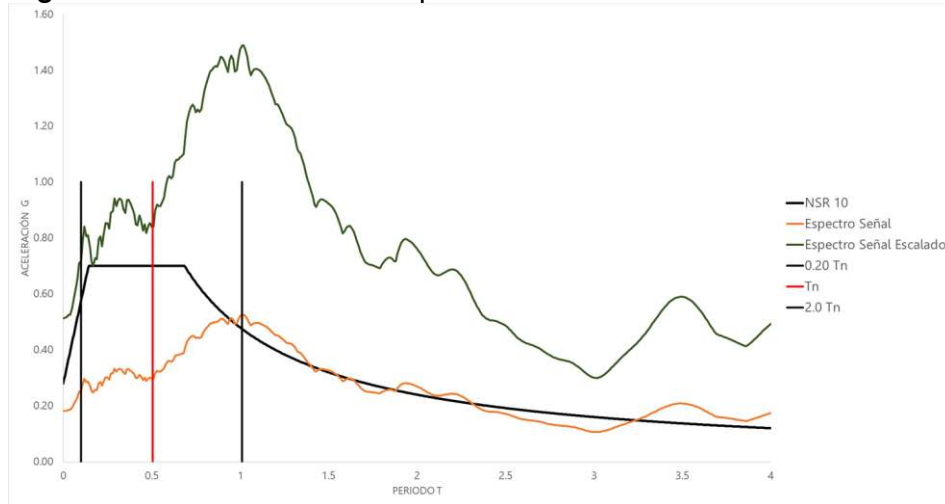
Factor de Escala	
0.20T _n -2.0T _n	
periodo natural (T _n)	0.505 s
0.20 T _n	0.101 s
2.0 T _n	1.01 s
S _a	0.540 %g
S _a Señal	0.245 %g
Factor escala	<u>2.20</u>

Fuente: el Autor

Figura 3–39: Sismo Ibagué Cam la Pola Escalado - Residencial



Fuente: el Autor

Figura 3–40: Factor de Escala para el sismo Gobernación – Residencial

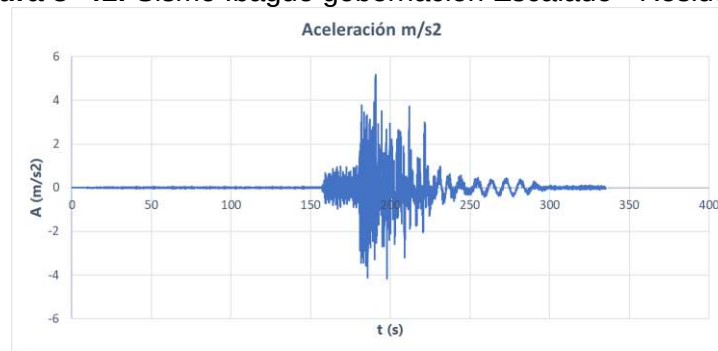
Fuente: el Autor

En la tabla 3-16 se muestra el factor de escala para la señal sintética generada para GOBERNACIÓN con el edificio correspondiente a Residencial el cual se cataloga en un grupo de uso I.

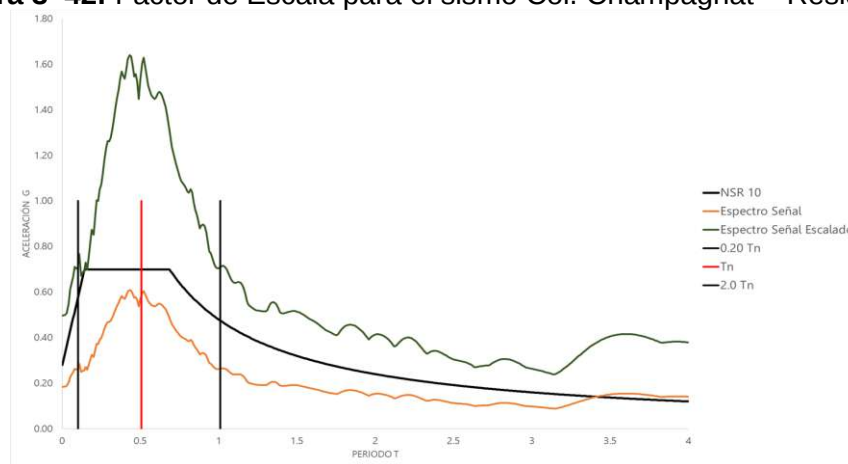
Tabla 3–16: Factor de Escala para el sismo Gobernación – Residencial

Factor de Escala	
$0.20T_n - 2.0T_n$	
periodo natural (T_n)	0.505 s
0.20 T_n	0.101 s
2.0 T_n	1.01 s
Sa	0.515 %g
Sa Señal	0.182 %g
Factor escala	<u>2.83</u>

Fuente: el Autor

Figura 3–41: Sismo Ibagué gobernación Escalado - Residencial

Fuente: el autor

Figura 3–42: Factor de Escala para el sismo Col. Champagnat – Residencial

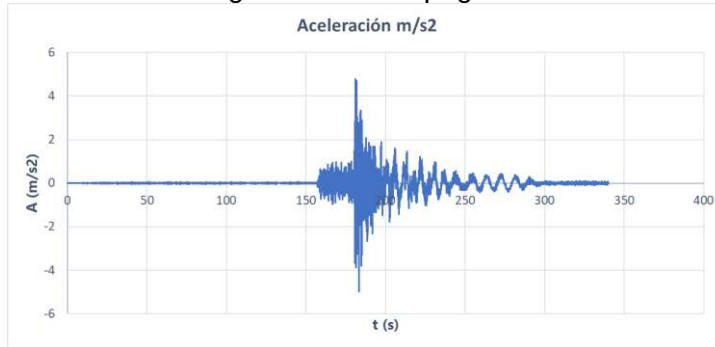
Fuente: el Autor

En la tabla 3-17 se muestra el factor de escala para la señal sintética generada para COL. CHAMPAGNAT con el edificio correspondiente a Residencia bifamiliar el cual se cataloga en un grupo de uso I.

Tabla 3–17: Factor de Escala para el sismo Col. Champagnat – Residencial

Factor de Escala	
$0.20T_n - 2.0T_n$	
periodo natural (T_n)	0.505 s
0.20 T_n	0.101 s
2.0 T_n	1.01 s
S_a	0.700 %g
S_a Señal	0.260 %g
Factor escala	<u>2.69</u>

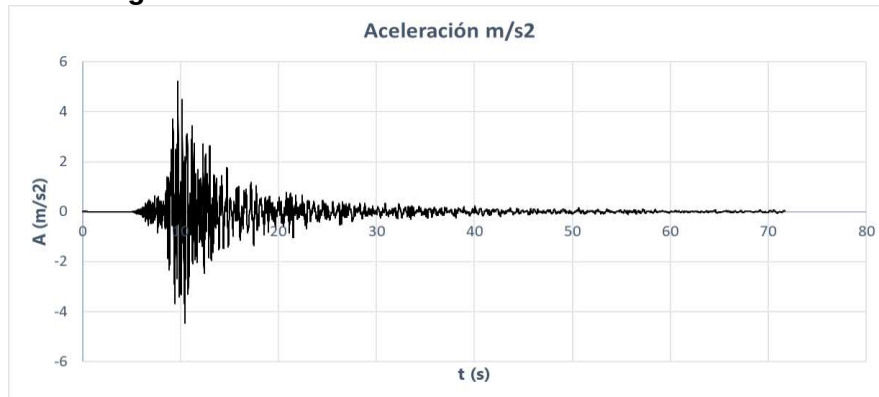
Fuente: el Autor

Figura 3–43: Sismo Ibagué Col. Champagnat Escalado - Residencial

Fuente: el Autor

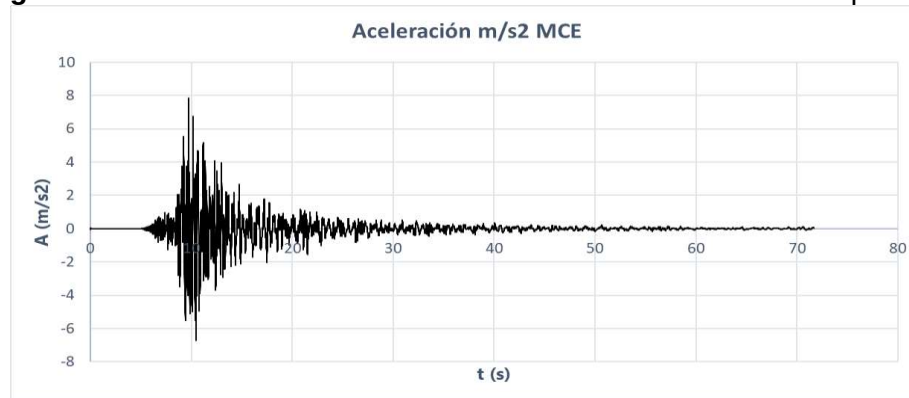
3.3.4 Amenaza sísmica nacional sismo de armenia 1999

De forma adicional Para la investigación se utilizó el sismo de armenia el cual ocurrió en 1999 y tiene cercanía a la ciudad de Ibagué. También para considerar una ocurrencia más probable de acuerdo con ASCE 7 - 22 se utilizó el Sismo Máximo Esperado (MCE) con un factor de 1.5. en la figura 3-44 se muestra la señal de aceleración del sismo de armenia sin escalar.

Figura 3–44: Sismo de Armenia 25 de enero de 1999

Fuente: el autor

Considerando la ASCE 7 -22 para obtener una probabilidad de ocurrencia del sismo de armenia se utiliza un factor de 1.5 que corresponde al máximo probable esperado, donde a la señal se le multiplica el factor y posterior se realiza el proceso del análisis de la señal para obtener los datos que se ingresaran a la mesa sísmica.

Figura 3–45: Sismo de Armenia Escalado con el factor máximo esperado.

Fuente: el Autor

3.3.5 Amenaza sísmica internacional

Con fin experimental se consideraron dos sismos de carácter internacional catalogados en la FEMA, con el propósito de ver el comportamiento de los modelos estructurales frente a una amenaza como el sismo de Ecuador ocurrido en el año 2016 y el sismo de Turquía Bolu en 1999.

3.4 Procesamiento de datos

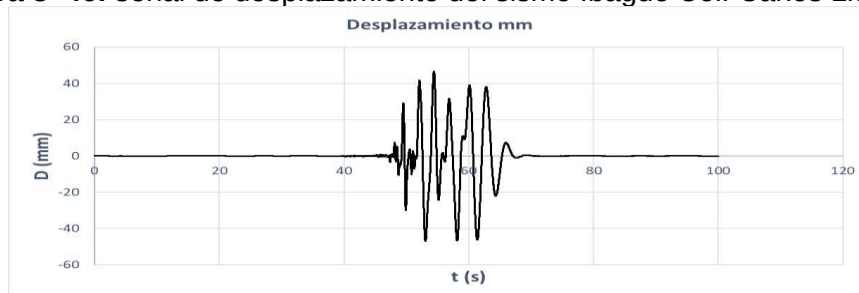
Con los datos de aceleraciones recolectados, se procedió a hacer una conversión de la información obtenida de términos de aceleración a términos de desplazamiento, puesto que, según las especificaciones técnicas de la mesa vibratoria para que se pueda replicar la señal se debe ingresar en términos de tiempo vs desplazamiento. Los resultados de este proceso se organizaron por separado para cada modelo estructural. El procedimiento se efectuó a través de un código de Matlab mostrado en el ANEXO 1 generado para obtener la Señal.

Mediante graficas se visualiza la integración de las señales para obtener los datos necesarios para el análisis los cuales se ingresarán en la mesa sísmica para replicar el movimiento del suelo, a las señales también se les debe ajustar, filtrar y ajustar línea base para recibir datos limpios y obtener una eficiencia en la simulación, para esto también se genera un código en Matlab mostrado en el ANEXO 2.

A continuación, se muestran todas las figuras de las señales de desplazamiento que se ingresaran a la mesa sísmica correspondiente a los sismos de Ibagué y Armenia que no

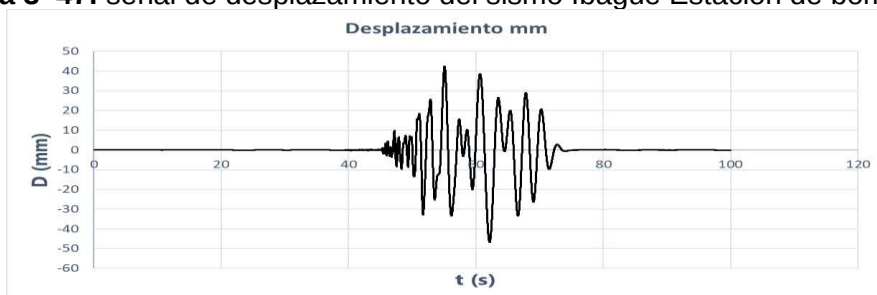
se encuentran catalogados, para el experimento con los modelos estructurales, en el ANEXO 4 se muestran los datos de la graficas correspondientes a las figuras de las señales de desplazamiento se muestran a continuación:

Figura 3–46: señal de desplazamiento del sismo Ibagué Col. Carlos Lleras R.



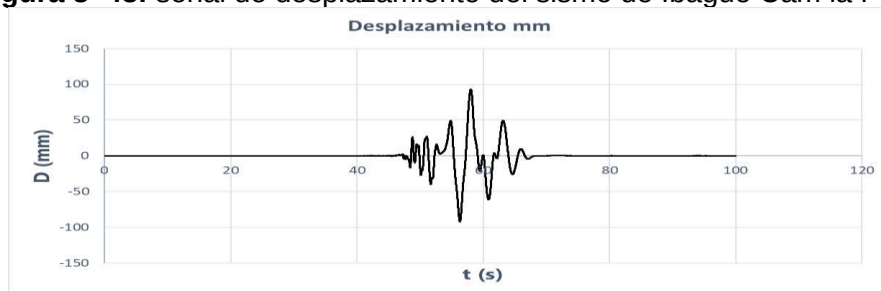
Fuente: el Autor

Figura 3–47: señal de desplazamiento del sismo Ibagué Estación de bomberos.

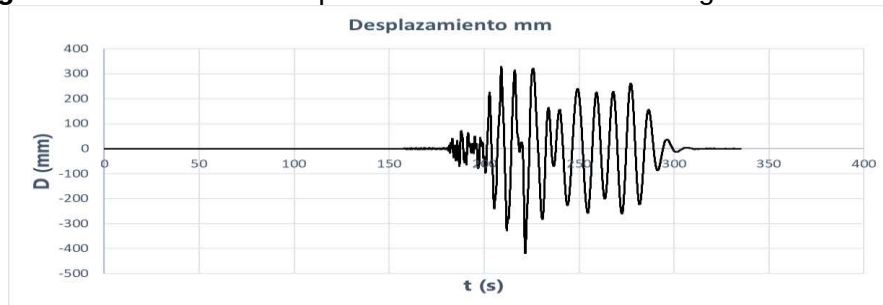


Fuente: el Autor

Figura 3–48: señal de desplazamiento del sismo de Ibagué Cam la Pola.



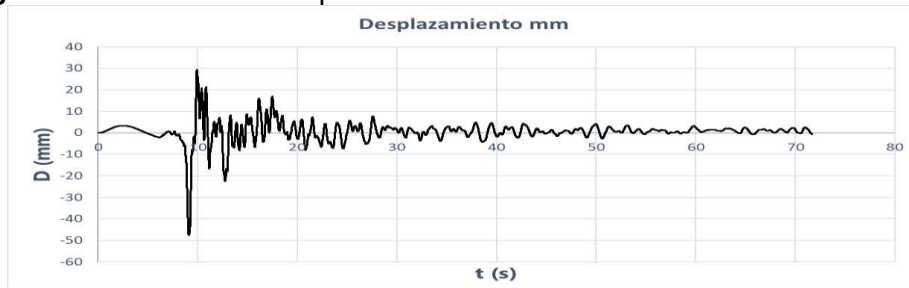
Fuente: el Autor

Figura 3–49: señal de desplazamiento del sismo de Ibagué Gobernación.

Fuente: el Autor

Figura 3–50: señal de desplazamiento del sismo de Ibagué Col Champagnat.

Fuente: el Autor

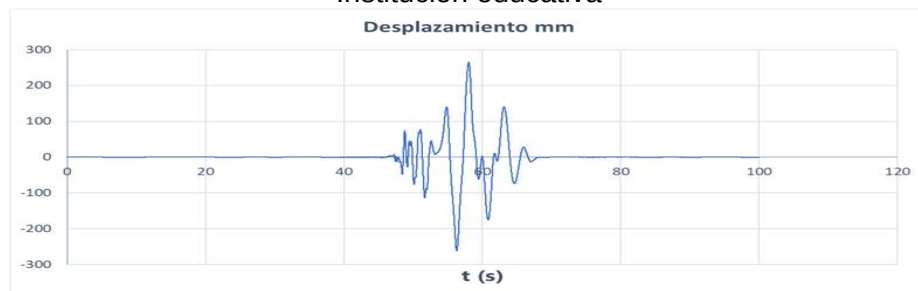
Figura 3–51: señal de desplazamiento del sismo de Armenia enero 25 1999

Fuente: el Autor

Figura 3–52: señal de desplazamiento del sismo de Armenia enero 25 1999 Máxima esperada según ASCE 7 – 22

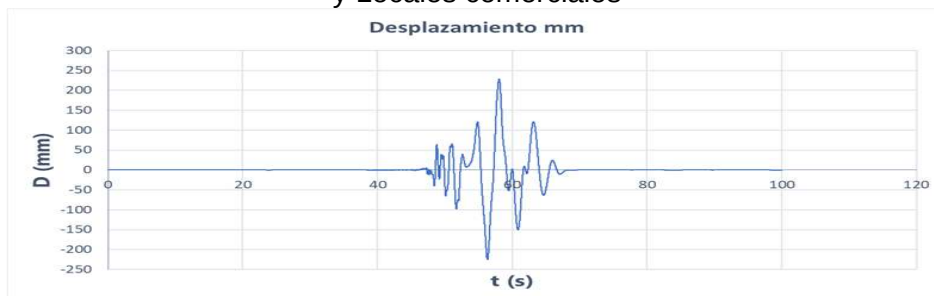
Fuente: el Autor

Figura 3–53: señal de desplazamiento sismo Ibagué Cam la pola Escalado para Institución educativa



Fuente: el Autor

Figura 3–54: señal de desplazamiento sismo Ibagué Cam la Pola Escalado para Oficinas y Locales comerciales



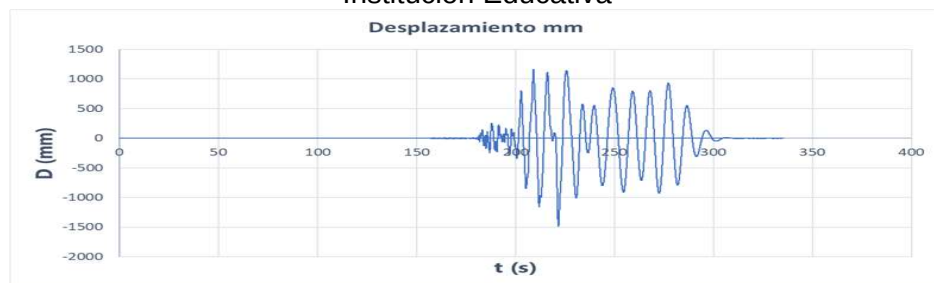
Fuente: el Autor

Figura 3–55: señal de desplazamiento sismo Ibagué Cam la Pola Escalado para Residencial



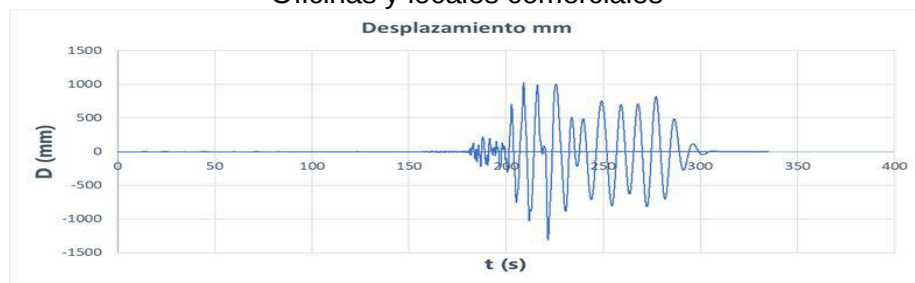
Fuente: el Autor

Figura 3–56: señal de desplazamiento sismo Ibagué Gobernación Escalado para Institución Educativa



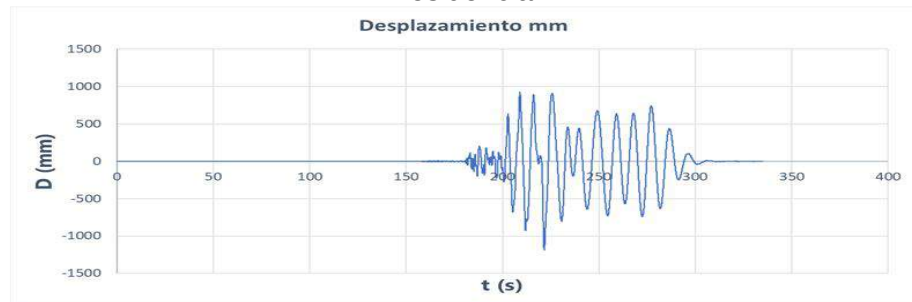
Fuente: el Autor

Figura 3–57: señal de desplazamiento sismo Ibagué Gobernación Escalado para Oficinas y locales comerciales



Fuente: el Autor

Figura 3–58: señal de desplazamiento sismo Ibagué Gobernación Escalado para Residencial



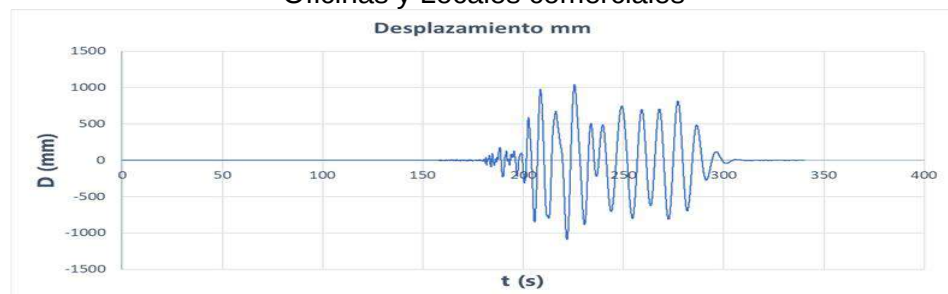
Fuente: el Autor

Figura 3–59: señal de desplazamiento sismo Ibagué Col. Champagnat Escalado para Institución Educativa



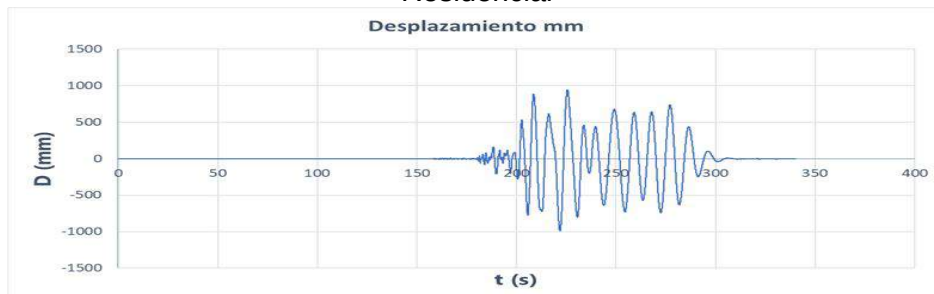
Fuente: el Autor

Figura 3–60: señal de desplazamiento sismo Ibagué Col. Champagnat Escalado para Oficinas y Locales comerciales



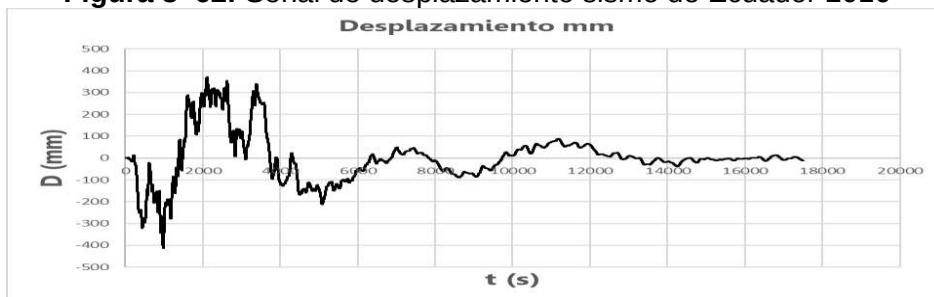
Fuente: el Autor

Figura 3–61: señal de desplazamiento sismo Ibagué Col. Champagnat Escalado para Residencial



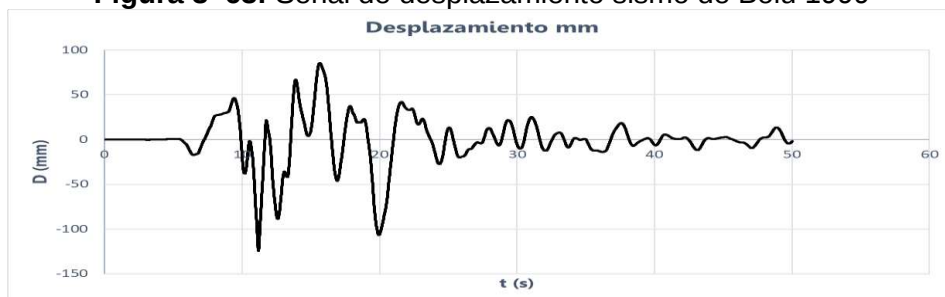
Fuente: el Autor

Figura 3–62: Señal de desplazamiento sismo de Ecuador 2016



Fuente: el Autor

Figura 3–63: Señal de desplazamiento sismo de Bolu 1999



Fuente: el Autor

3.5 Ajuste de los modelos

Teniendo la información de los modos de vibración y las propiedades dinámicas de los modelos estructurales seleccionados, se realizó el proceso de normalización o igualación de comportamiento mediante el ajuste de la rigidez global con respecto a la masa de los edificios de diseño a unos modelos estructurales reducidos para colocar en la mesa

sísmica. El edificio de diseño y el modelo estructural para la mesa sísmica se igualan en propiedades dinámicas teniendo como parámetro principal el periodo en cada sentido, para determinar estas características el proceso se soportó con ayuda del software donde se realiza la comparación de comportamiento del edificio real respecto al modelo estructural donde se comparó y ajustó en gran medida los primeros modos de vibración de cada modelo, encontrando así una igualación en las propiedades dinámicas para calibrar el modelo que se va a colocar en la mesa sísmica. Para esta propuesta de caracterización se tuvo en cuenta las siguientes ecuaciones que describen una estructura:

Ecuación para determinar el periodo T donde m es la masa por carga muerta y k la rigidez del sistema estructural.

$$T = 2 * \pi * \sqrt{\frac{m}{k}}$$

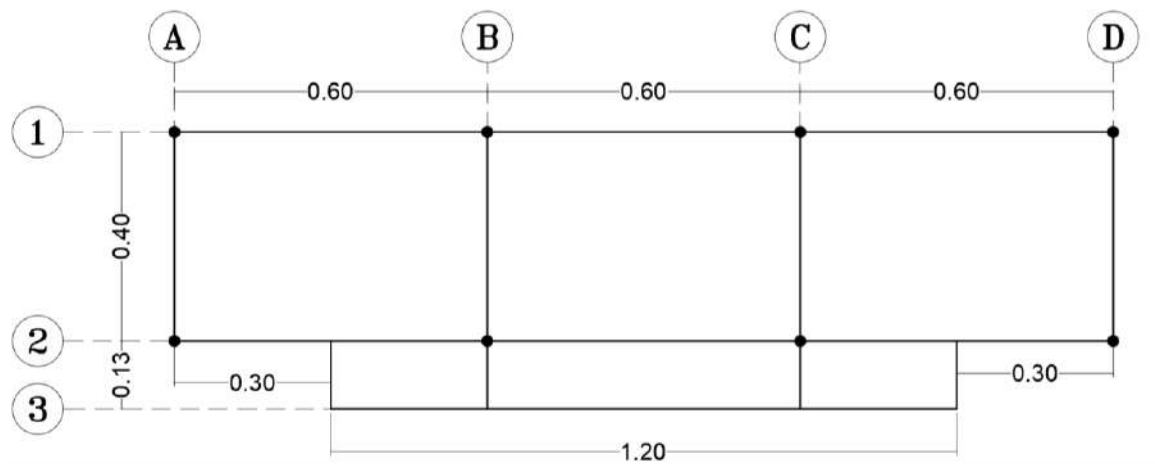
Donde se debe cumplir lo siguiente:

$$\text{Periodo } T \text{ Edificio de Diseño} \cong \text{Periodo } T \text{ Modelo Estructural}$$

Considerando lo anterior se muestran a continuación los modelos estructurales con sus respectivos parámetros.

3.5.1 Modelo estructural institución educativa de tres pisos

En la figura 3-64 se muestra la planta estructural del piso uno al tres del modelo estructural correspondiente a la institución educativa de tres pisos. Las unidades mostradas se encuentran en metros.

Figura 3–64: Planta estructural del modelo estructural de la institución educativa para la mesa sísmica

Fuente: el Autor

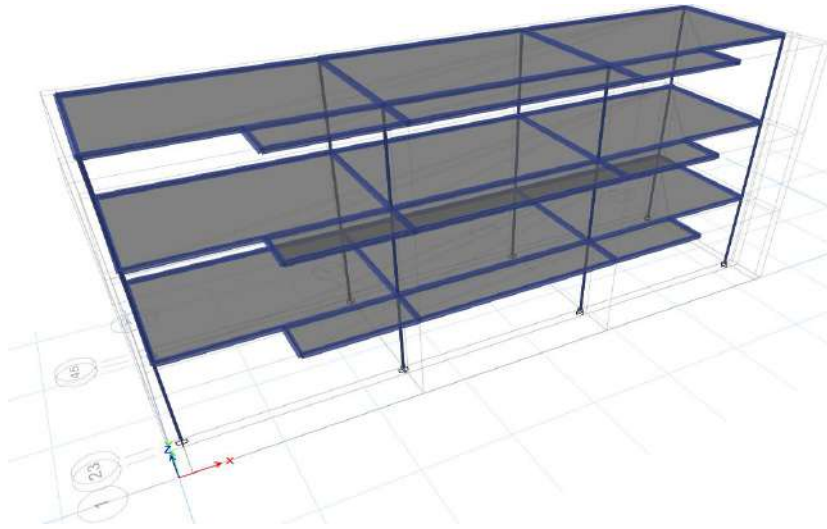
En la tabla 3-18 se muestran los datos del modelo estructural de la institución educativa de tres pisos considerados en el análisis estructural para colocar en la mesa sísmica. La tabla también muestra las características dinámicas que son sus periodos en ambos sentidos los cuales son considerados para la calibración con el edificio de diseño y en la mesa sísmica.

Tabla 3–18: Datos del modelo estructural de la institución educativa de tres pisos para la mesa sísmica

DATOS DEL MODELO ESTRUCTURAL	
Material	Acero
Sistema Estructural	Pórticos
Modulo Elástico Acero	200000 MPa
Carga por Piso	15.8 kg/m ²
Carga en Cubierta	11.4 kg/m ²
Altura Total	96 cm
Número de Pisos	3
Diámetro de Varilla	5.5 mm
Periodo Eje X	0.40 s
Periodo Eje Y	0.40 s

Fuente: el Autor

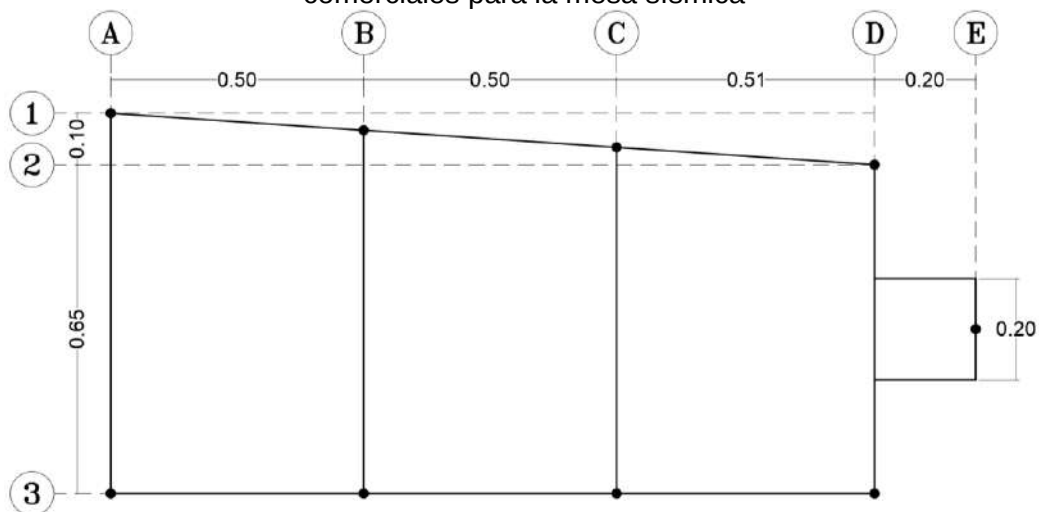
En la Figura 3-65 se muestra el modelo digital en tres dimensiones del modelo estructural de la institución educativa de 3 pisos para el análisis en la mesa sísmica.

Figura 3–65: Modelo digital de la institución educativa de tres pisos para mesa sísmica

Fuente: el Autor

3.5.2 Modelo estructural oficinas y locales comerciales de tres pisos

En la figura 3-66 se muestra la planta estructural del piso uno al tres del modelo estructural correspondiente a oficinas y locales comerciales de 3 pisos. Las unidades mostradas se encuentran en metros.

Figura 3–66: Planta estructural del modelo estructural de las oficinas y locales comerciales para la mesa sísmica

Fuente: el Autor

En la tabla 3-19 se muestran los datos del modelo estructural de las oficinas y locales comerciales de tres pisos considerados en el análisis estructural para colocar en la mesa sísmica. La tabla también muestra las características dinámicas que son sus periodos en ambos sentidos los cuales son considerados para la calibración con el edificio de diseño y en la mesa sísmica.

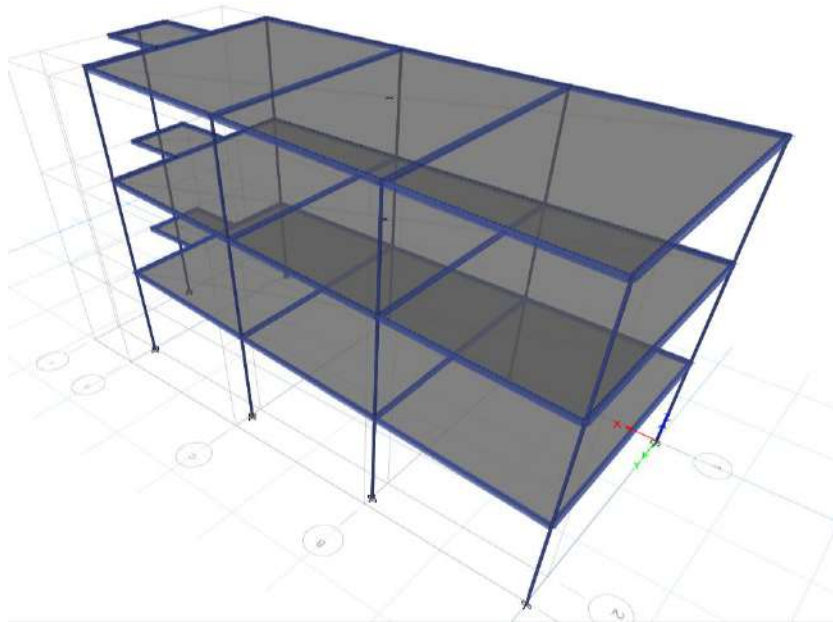
Tabla 3–19: Datos del modelo estructural de las oficinas y locales comerciales de tres pisos para la mesa sísmica

DATOS DEL MODELO ESTRUCTURAL	
Material	Acero
Sistema Estructural	Pórticos
Modulo Elástico Acero	200000 MPa
Carga por Piso	8.80 kg/m ²
Carga en Cubierta	8.80 kg/m ²
Altura Total	120 cm
Número de Pisos	3
Diámetro de Varilla	5.5 mm
Periodo Eje X	0.43 s
Periodo Eje Y	0.47 s

Fuente: el Autor

En la figura 3-67 se muestra el modelo digital en tres dimensiones del modelo estructural de las oficinas y locales comerciales de tres pisos para el análisis en la mesa sísmica.

Figura 3–67: Modelo digital de las oficinas y locales comerciales de tres pisos para mesa sísmica

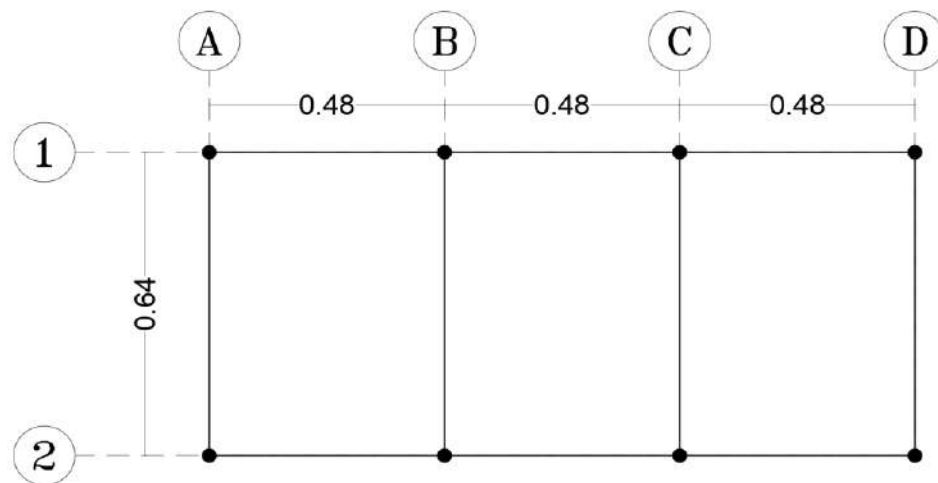


Fuente: el Autor

3.5.3 Modelo estructural residencial de cinco pisos

En la figura 3-68 se muestra la planta estructural del piso uno al cinco del modelo estructural correspondiente a residencial de cinco pisos. Las unidades mostradas se encuentran en metros.

Figura 3–68: Planta estructural del modelo estructural residencial para la mesa sísmica



Fuente: el Autor

En la tabla 3-20 se muestran los datos del modelo estructural residencial de cinco pisos considerados en el análisis estructural para colocar en la mesa sísmica. La tabla también muestra las características dinámicas que son sus periodos en ambos sentidos los cuales son considerados para la calibración con el edificio de diseño y en la mesa sísmica.

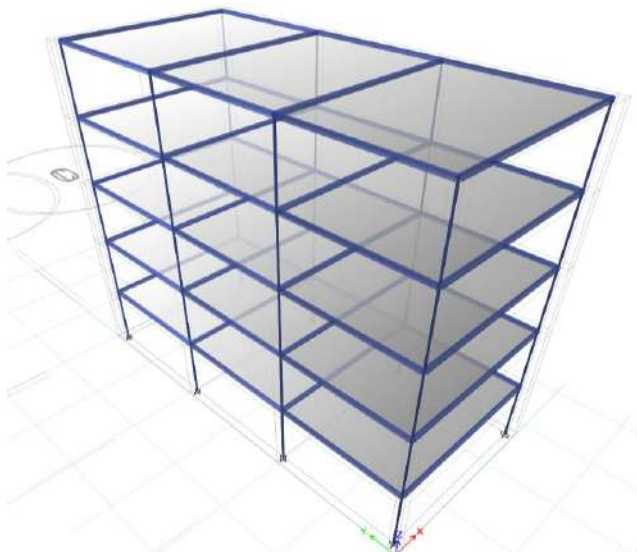
Tabla 3–20: Datos del modelo estructural residencial de cinco pisos para la mesa sísmica

DATOS DEL MODELO ESTRUCTURAL	
Material	Acero
Sistema Estructural	Pórticos
Modulo Elástico	200000 MPa
Carga por Piso	8.00 kg/m ²
Carga en Cubierta	8.00 kg/m ²
Altura Total	140 cm
Número de Pisos	5
Diámetro de Varilla	5.5 mm
Periodo Eje X	0.50 s
Periodo Eje Y	0.50 s

Fuente: el Autor

En la figura 3-69 se muestra el modelo digital en tres dimensiones del modelo estructural residencial de cinco pisos para el análisis en la mesa sísmica.

Figura 3–69: Modelo digital residencial de cinco pisos para mesa sísmica



Fuente: el Autor

4. Ensayo de los modelos estructurales en mesa sísmica

Para recopilar la información de los ensayos realizados en la mesa sísmica bajo el registro de acelerogramas seleccionados, se procede a ensayar cada uno de los modelos contruidos. Para obtener datos primero se realiza un proceso de calibración en donde se busca que el periodo natural encontrado con los modelos matemáticos es el mismo colocado en la mesa sísmica al introducirle una señal armónica, una vez se encuentra el periodo natural se procede a ingresar cada uno de los registros de desplazamientos mostrados en el capítulo 3.4 (Procesamiento de Datos) y posteriormente se comparará que la señal ingresada en la mesa sea igual que la arrojada por el acelerómetro en la base para no tener errores ni demasiada dispersión en la toma de datos.

Al sistema de control se le ingresa cada una de las señales de desplazamiento, para obtener una respuesta experimental de cada uno de los modelos estructurales que representa las edificaciones de diseño puestas en la ciudad de Ibagué con su respectiva amenaza sísmica (Sismos de Ibagué), con la de Armenia (Municipio cercano) y adicional los sismo de la fema Ecuador y Bolu (Amenaza Internacional). Cada modelo estructural se considera de forma analítica como un modelo de varios grados de libertad que pretende simular el comportamiento dinámico del edificio de diseño y su posible respuesta ante cada sismo ingresado, representando un comportamiento probable. Para la simulación se tienen las siguientes características en el laboratorio de estructuras de la Universidad Nacional Sede Manizales: Una estación de control, la Mesa sísmica, Una bomba de inyección de aceite para el actuador, un control de datos y cuatro acelerómetros.

Figura 4–1: Estación de control de la mesa sísmica del laboratorio de estructuras de la universidad Nacional de Colombia sede Manizales



Fuente: el Autor

Para el montaje de los modelos estructurales en la mesa sísmica se realizó un anclaje a la base por medio de una estiva de madera para generar facilidad al momento de cambiar de modelo y también el sentido de análisis (Eje X y Eje Y). Cada modelo estructural fue ensayado con las señales de aceleración correspondientes a los sismos de Ibagué, a la fuente cercana sismo de Armenia y de forma adicional los dos sismos de la fema Ecuador 2016 y Bolu – Turquía 1999.

Al proceder a ensayar cada uno de los modelos estructurales, utilizando las señales tratadas y transformadas a desplazamiento para ser ingresadas en la mesa, se obtienen los datos de cada acelerómetro los cuales son registrados en la estación de control y transformados a un archivo TXT para posteriormente realizarles un proceso de tratado, corrección, conversión y ajuste de los datos numéricos mediante unos códigos de Matlab (ANEXO 1 y ANEXO 2). En la figura 4-2 se muestra un apartado de los datos obtenidos de un sismo de Ibagué en la estación de control de la mesa sísmica. (toda la información se presenta en el ANEXO 4).

Figura 4–2: Datos obtenidos de un sismo de Ibagué en la estación de control de la mesa sísmica

MODELO RESIDENCIAL EJE X						MODELO RESIDENCIAL EJE Y					
Tiempo de ejecución	Actuador_m esa	Actuador_m esa	Actuador_m esa	Actuador_m esa	Actuador_m esa	Tiempo de ejecución	Actuador_m esa	Actuador_m esa	Actuador_m esa	Actuador_m esa	Actuador_m esa
	Desplazamiento	Aceleración	Aceleración	Aceleración	Aceleración		Desplazamiento	Aceleración	Aceleración	Aceleración	Aceleración
seg	mm	mm/s ²	mm/s ²	mm/s ²	mm/s ²	seg	mm	mm/s ²	mm/s ²	mm/s ²	mm/s ²
5.18457031	-0.00426853	27.4813399	-117.204003	-176.763803	-87.6478627	5.23339844	-0.02298086	-2.90373224	111.778334	165.156826	139.748603
5.19433594	-0.00978218	26.7900117	-197.52945	-117.814906	-45.9367149	5.24316406	-0.02521463	-3.07423458	115.733199	167.240366	82.0210502
5.20410156	-0.0122583	25.3919493	-201.985717	-54.5501225	-111.722007	5.25292969	-0.02682534	26.1078216	152.495682	175.088495	0.59494376
5.21386719	-0.01347734	7.86638353	-213.191256	-131.003737	-93.7562957	5.26269531	-0.02967736	0.89465396	135.136217	191.223189	48.3317338
5.22363281	-0.01509413	17.0027763	-109.053753	-92.9981619	-108.674906	5.27246094	-0.03063487	-22.9816325	116.968729	193.952054	19.8437665
5.23339844	-0.01914719	20.0870689	-132.500514	-91.2275165	-105.42842	5.28222656	-0.03429735	27.9617906	161.141768	158.54919	23.692891
5.24316406	-0.0253902	37.7691984	-191.164434	-100.03043	-61.5366921	5.29199219	-0.03675705	-14.9420099	128.616184	148.702905	128.349513
5.25292969	-0.02623245	17.4819361	-173.825532	-90.5368552	-57.1067445	5.30175781	-0.03527287	19.4129869	88.6291265	136.090755	51.6450144
5.26269531	-0.02688302	34.7017944	-178.165883	-124.019846	-44.1653207	5.31152344	-0.04089699	-8.72185733	175.611347	189.499468	90.2906805
5.27246094	-0.03216112	9.42247454	-168.668598	-79.2492852	-47.1232161	5.32128906	-0.03964865	17.7993421	129.532561	217.429355	35.0101702
5.28222656	-0.03426417	13.3661833	-184.085935	-106.626734	-58.8709526	5.33105469	-0.03859982	17.8880543	99.0598127	202.661768	68.1670755
5.29199219	-0.03486242	29.9732331	-83.8993266	-68.1040287	-52.7037531	5.34082031	-0.04320759	-8.41139816	165.16149	171.744838	75.9436488

Fuente: el Autor

Con la información obtenida de cada sismo con cada modelo estructural, una vez tratada y revisada se procede a tomar información de carácter importante como lo es la aceleración y desplazamiento absoluto obtenido para proceder con los análisis de los resultados con cada modelo estructural de acuerdo con las respuestas presentes por cada sismo introducido y ensayado como se muestra a continuación.

4.1 Resultados del modelo estructural de la institución educativa de tres pisos

En la figura 4-3, se muestra el modelo estructural construido de la institución educativa colocado sobre la mesa sísmica desde diferentes perspectivas en el laboratorio de estructuras de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales.

Figura 4–3: Perspectivas del modelo estructural de la institución educativa sobre la Mesa Sísmica – Laboratorio de Estructuras- Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales



Fuente: el Autor

En la Tabla 4-1, se muestran los desplazamientos y aceleraciones máximas absolutas (Abs) tomadas de la información obtenida del ensayo con cada sismo en cada eje de análisis para el modelo estructural de la institución educativa de tres pisos ensayado en la mesa sísmica.

Tabla 4–1: Desplazamientos y Aceleraciones máximas absolutas de cada sismo para el modelo estructural de la institución educativa

SISMO	PISO	Desplazamiento Máximo Abs Eje X	Desplazamiento Máximo Abs Eje Y	Aceleración Máxima Abs Eje X	Aceleración Máxima Abs Eje Y
Ibagué Col. Carlos Lleras	1	15.94 mm	17.48 mm	0.47 %g	0.47 %g
	2	33.12 mm	24.72 mm	0.61 %g	0.61 %g
	3	30.50 mm	37.59 mm	0.82 %g	0.82 %g
Ibagué Estación de Bomberos	1	42.13 mm	43.13 mm	0.75 %g	0.75 %g
	2	42.13 mm	40.12 mm	0.75 %g	0.75 %g
	3	39.49 mm	37.80 mm	0.91 %g	0.91 %g
	1	40.15 mm	42.65 mm	0.69 %g	0.69 %g

Ibagué Cam La Pola	2	41.25 mm	43.75 mm	0.70 %g	0.70 %g
	3	43.40 mm	45.90 mm	0.75 %g	0.75 %g
Ibagué Gobernación	1	38.56 mm	41.06 mm	0.59 %g	0.59 %g
	2	39.85 mm	42.35 mm	0.65 %g	0.65 %g
	3	41.56 mm	44.06 mm	0.79 %g	0.79 %g
Ibagué Col. Champagnat	1	32.04 mm	34.54 mm	0.64 %g	0.64 %g
	2	34.85 mm	37.35 mm	0.64 %g	0.64 %g
	3	38.45 mm	40.95 mm	0.68 %g	0.68 %g
Armenia	1	35.55 mm	38.05 mm	0.43 %g	0.43 %g
	2	43.45 mm	45.95 mm	0.76 %g	0.76 %g
	3	44.65 mm	47.15 mm	0.78 %g	0.78 %g
Armenia MCE	1	53.33 mm	55.83 mm	0.65 %g	0.65 %g
	2	65.18 mm	67.68 mm	1.14 %g	1.14 %g
	3	66.98 mm	69.48 mm	1.17 %g	1.17 %g
Ibagué Cam La Pola Escalado	1	51.39 mm	54.59 mm	0.88 %g	0.88 %g
	2	52.80 mm	56.00 mm	0.90 %g	0.90 %g
	3	55.55 mm	58.75 mm	0.96 %g	0.96 %g
Ibagué Gobernación Escalado	1	57.84 mm	61.59 mm	0.89 %g	0.89 %g
	2	59.78 mm	63.53 mm	0.98 %g	0.98 %g
	3	62.34 mm	66.09 mm	1.19 %g	1.19 %g
Ibagué Col. Champagnat Escalado	1	45.82 mm	49.39 mm	0.92 %g	0.92 %g
	2	49.84 mm	53.41 mm	0.92 %g	0.92 %g
	3	54.98 mm	58.56 mm	0.97 %g	0.97 %g
Ecuador	1	42.66 mm	45.66 mm	0.60 %g	0.60 %g
	2	52.14 mm	49.15 mm	1.06 %g	1.06 %g
	3	53.58 mm	51.25 mm	1.10 %g	1.10 %g
Bolu	1	39.11 mm	41.86 mm	0.47 %g	0.47 %g
	2	47.80 mm	50.55 mm	0.84 %g	0.84 %g
	3	49.12 mm	51.87 mm	0.86 %g	0.86 %g

Fuente: el Autor

4.2 Resultados del modelo estructural de las oficinas y locales comerciales de tres pisos

En la figura 4-4, se muestra el modelo estructural de las oficinas y locales comerciales colocado sobre la mesa sísmica desde diferentes perspectivas en el laboratorio de estructuras de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales.

Figura 4-4: Perspectivas del modelo estructural de las oficinas y locales comerciales sobre la Mesa Sísmica – Laboratorio de Estructuras- Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales



Fuente: el Autor

En la Tabla 4-2, se muestran los desplazamientos y aceleraciones máximas absolutas (Abs) tomadas de la información obtenida del ensayo con cada sismo en cada eje de análisis para el modelo estructural de las oficinas y locales comerciales de tres pisos ensayado en la mesa sísmica.

Tabla 4-2: Desplazamientos y Aceleraciones máximas absolutas de cada sismo para el modelo estructural de las oficinas y locales comerciales

SISMO	PISO	Desplazamiento Máximo Abs Eje X	Desplazamiento Máximo Abs Eje Y	Aceleración Máxima Abs Eje X	Aceleración Máxima Abs Eje Y
Ibagué Col. Carlos Lleras	1	36.49 mm	34.49 mm	0.65 %g	0.65 %g
	2	43.08 mm	41.08 mm	0.90 %g	0.90 %g
	3	42.15 mm	40.15 mm	1.05 %g	1.05 %g
Ibagué Estación de Bomberos	1	35.99 mm	33.99 mm	0.67 %g	0.67 %g
	2	42.58 mm	40.58 mm	0.92 %g	0.92 %g
	3	41.65 mm	39.65 mm	1.07 %g	1.07 %g
	1	36.99 mm	34.99 mm	0.68 %g	0.68 %g

Ibagué Cam La Pola	2	43.58 mm	41.58 mm	0.93 %g	0.93 %g
	3	42.65 mm	40.65 mm	1.08 %g	1.08 %g
Ibagué Gobernación	1	36.89 mm	34.49 mm	0.70 %g	0.70 %g
	2	43.48 mm	41.08 mm	0.95 %g	0.95 %g
	3	42.55 mm	40.15 mm	1.10 %g	1.10 %g
Ibagué Col. Champagnat	1	37.49 mm	35.49 mm	0.71 %g	0.71 %g
	2	44.08 mm	42.08 mm	0.96 %g	0.96 %g
	3	43.15 mm	41.15 mm	1.11 %g	1.11 %g
Armenia	1	37.39 mm	35.44 mm	0.73 %g	0.73 %g
	2	43.98 mm	41.65 mm	0.98 %g	0.98 %g
	3	43.05 mm	42.80 mm	1.13 %g	1.13 %g
Armenia MCE	1	56.09 mm	53.16 mm	1.09 %g	1.09 %g
	2	65.96 mm	62.48 mm	1.46 %g	1.46 %g
	3	64.58 mm	64.20 mm	1.69 %g	1.69 %g
Ibagué Cam La Pola Escalado	1	47.35 mm	44.79 mm	0.87 %g	0.87 %g
	2	55.78 mm	53.22 mm	1.19 %g	1.19 %g
	3	54.59 mm	52.03 mm	1.38 %g	1.38 %g
Ibagué Gobernación Escalado	1	55.34 mm	51.74 mm	1.04 %g	1.04 %g
	2	65.21 mm	61.61 mm	1.42 %g	1.42 %g
	3	63.83 mm	60.23 mm	1.64 %g	1.64 %g
Ibagué Col. Champagnat Escalado	1	53.61 mm	50.75 mm	1.02 %g	1.02 %g
	2	63.03 mm	60.17 mm	1.37 %g	1.37 %g
	3	61.70 mm	58.84 mm	1.59 %g	1.59 %g
Ecuador	1	44.87 mm	42.53 mm	1.02 %g	1.02 %g
	2	52.77 mm	49.98 mm	1.37 %g	1.37 %g
	3	51.66 mm	51.36 mm	1.58 %g	1.58 %g
Bolu	1	41.13 mm	38.98 mm	0.80 %g	0.80 %g
	2	48.37 mm	45.82 mm	1.07 %g	1.07 %g
	3	47.36 mm	47.08 mm	1.24 %g	1.24 %g

Fuente: el Autor

4.3 Resultados del modelo estructural residencial de cinco pisos

En la figura 4-5, se muestra el modelo estructural residencial colocado sobre la mesa sísmica desde diferentes perspectivas en el laboratorio de estructuras de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales.

Figura 4–5: Perspectivas del modelo estructural residencial sobre la Mesa Sísmica – Laboratorio de Estructuras- Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales



Fuente: el Autor

En la Tabla 4-3, se muestran los desplazamientos y aceleraciones máximas absolutas (Abs) tomadas de la información obtenida del ensayo con cada sismo en cada eje de análisis para el modelo estructural de la residencia bifamiliar de cinco pisos ensayado en la mesa sísmica.

Tabla 4–3: Desplazamientos y Aceleraciones máximas absolutas de cada sismo para el modelo estructural residencial

SISMO	PISO	Desplazamiento Máximo Abs Eje X	Desplazamiento Máximo Abs Eje Y	Aceleración Máxima Abs Eje X	Aceleración Máxima Abs Eje Y
Ibagué Col. Carlos Lleras	1	21.41 mm	18.04 mm	0.46 %g	0.46 %g
	2	53.82 mm	65.20 mm	0.91 %g	0.91 %g
	3	67.18 mm	74.85 mm	1.22 %g	1.22 %g
	1	20.91 mm	17.54 mm	0.48 %g	0.48 %g
	2	53.32 mm	64.70 mm	0.93 %g	0.93 %g

Ibagué Estación de Bomberos	3	66.68 mm	57.32 mm	1.24 %g	1.24 %g
Ibagué Cam La Pola	1	21.91 mm	18.54 mm	0.49 %g	0.49 %g
	2	54.32 mm	65.70 mm	0.94 %g	0.94 %g
	3	67.68 mm	75.35 mm	1.25 %g	1.25 %g
Ibagué Gobernación	1	21.41 mm	18.04 mm	0.51 %g	0.51 %g
	2	53.82 mm	65.20 mm	0.96 %g	0.96 %g
	3	67.18 mm	57.82 mm	1.27 %g	1.27 %g
Ibagué Col. Champagnat	1	22.41 mm	19.04 mm	0.52 %g	0.52 %g
	2	54.82 mm	66.20 mm	0.97 %g	0.97 %g
	3	68.18 mm	75.85 mm	1.28 %g	1.28 %g
Armenia	1	21.91 mm	18.54 mm	0.54 %g	0.54 %g
	2	54.32 mm	65.70 mm	0.99 %g	0.99 %g
	3	67.68 mm	58.32 mm	1.30 %g	1.30 %g
Armenia MCE	1	32.87 mm	35.37 mm	0.81 %g	0.81 %g
	2	81.48 mm	83.98 mm	1.48 %g	1.48 %g
	3	101.52 mm	104.02 mm	1.94 %g	1.94 %g
Ibagué Cam La Pola Escalado	1	28.04 mm	23.72 mm	0.63 %g	0.63 %g
	2	69.53 mm	84.10 mm	1.20 %g	1.20 %g
	3	86.63 mm	96.45 mm	1.60 %g	1.60 %g
Ibagué Gobernación Escalado	1	32.12 mm	27.05 mm	0.76 %g	0.76 %g
	2	80.73 mm	97.80 mm	1.43 %g	1.43 %g
	3	100.77 mm	86.72 mm	1.90 %g	1.90 %g
Ibagué Col. Champagnat Escalado	1	32.05 mm	27.22 mm	0.75 %g	0.75 %g
	2	78.39 mm	94.67 mm	1.39 %g	1.39 %g
	3	97.50 mm	108.47 mm	1.83 %g	1.83 %g
Ecuador	1	26.29 mm	22.24 mm	0.75 %g	0.75 %g
	2	65.18 mm	78.84 mm	1.38 %g	1.38 %g
	3	81.22 mm	69.98 mm	1.81 %g	1.81 %g
Bolu	1	24.10 mm	20.39 mm	0.59 %g	0.59 %g
	2	59.75 mm	72.27 mm	1.08 %g	1.08 %g
	3	74.45 mm	64.15 mm	1.42 %g	1.42 %g

Fuente: el Autor

5. Análisis y resultados de la caracterización de los modelos estructurales con sismos de Ibagué

Al procesar los datos obtenidos a partir de los ensayos experimentales realizados sobre cada uno de los modelos estructurales en la mesa sísmica, los cuales representan y caracterizan los edificios de diseño seleccionados para probar bajo sismos ocurridos en Ibagué, Armenia y la Fema, se obtuvo que los periodos naturales de cada uno se igualaron con un margen de relación del 1 al 5% como se muestra en la tabla 5-1 con relación entre ellos en cada dirección de análisis.

Tabla 5–1: Periodo natural de los modelos estructurales en mesa sísmica y los edificios de diseño

EDIFICIO/MODELO	Periodo Edificio de Diseño en Eje X	Periodo Edificio de Diseño en Eje Y	Periodo Modelo Estructural Eje X	Periodo Modelo Estructural Eje Y	Relación en sentido del Eje X	Relación en sentido del Eje Y
INSTITUCIÓN EDUCATIVA DE 3 PISOS	0.402 s	0.391 s	0.400 s	0.400 s	0.995	0.978
OFICINAS Y LOCALES DE 3 PISOS	0.479 s	0.422 s	0.470 s	0.430 s	0.981	0.981
RESIDENCIAL DE 5 PISOS	0.513 s	0.497 s	0.500 s	0.500 s	0.975	0.994

Fuente: el Autor

Como parámetro base de los modelos estructurales, los datos obtenidos mediante periodo natural presentadas por el ensayo en la mesa sísmica nos permiten describir las propiedades dinámicas de los edificios de diseño, para verificar la compatibilidad entre los modelos estructurales y los edificios seleccionados se realizó un planteamiento donde la

aceleración recibida por cada uno de los sismos debe ser similar, teniendo como modelo matemático la cortante recibida en la base, como se muestra en la siguiente ecuación.

$$V_{sj} = m * g * S_a$$

V_{sj} : cortante en la base

m : La masa de la estructura

g : gravedad 9.81 m/s²

S_a : aceleración del sismo

con el modelo matemático propuesto se estableció y comprobó una relación para cada uno de los modelos estructurales como parámetro de normalización para caracterizar su comportamiento dinámico frente a cada sismo, se toman los datos de los edificios de diseño y con los obtenidos del ensayo en la mesa sísmica se utiliza el siguiente modelo matemático planteado que considera la igualación de aceleraciones recibidas.

$$S_a = \frac{V_{sj \text{ de Diseño}}}{Masa \text{ de Diseño} * Gravedad} = \frac{V_{sj \text{ del Modelo Estructural}}}{Masa \text{ del Modelo Estructural} * Gravedad} = S_a$$

La tabla 5-2, muestra los factores de normalización con el cortante en la base para el modelo estructural y el edificio de diseño de la institución educativa de 3 pisos con cada sismo al que fue sometido en el ensayo en la mesa sísmica, de acuerdo con el modelo matemático planteado por aceleraciones recibidas. Se observó que las cortantes se igualaron con una relación del 1 al 15%, lo cual nos dice que la aceleración recibida por el modelo estructural en la mesa sísmica representa en buena medida el edificio de diseño.

Tabla 5–2: Factor de Normalización del cortante del modelo estructural con el edificio de diseño para la institución educativa de 3 pisos con cada sismo

MODELO ESTRUCTURAL INSTITUCIÓN EDUCATIVA DE 3 PISOS												
SISMO	Modelo del Edificio			Edificio Diseñado - Construido			Normalización Modelo		Normalización Edificio Diseñado		Relación	
	Masa	Vs Eje X	Vs Eje Y	Masa	Vs Eje X	Vs Eje Y	EJE X	EJE Y	EJE X	EJE Y	EJE X	EJE Y
Ibagué Col. Carlos Lleras	0.43 kN	0.23 kN	0.23 kN	10461 kN	4954 kN	4935 kN	0.53	0.54	0.47	0.47	1.13	1.15
Ibagué Estación de Bomberos	0.43 kN	0.15 kN	0.15 kN	10461 kN	3120 kN	3240 kN	0.34	0.35	0.30	0.31	1.14	1.13
Ibagué Cam La Pola	0.43 kN	0.25 kN	0.25 kN	10461 kN	5806 kN	5768 kN	0.59	0.59	0.56	0.55	1.06	1.07
Ibagué Gobernación	0.43 kN	0.12 kN	0.12 kN	10461 kN	2637 kN	2827 kN	0.27	0.28	0.25	0.27	1.08	1.04
Ibagué Col. Champagnat	0.43 kN	0.22 kN	0.22 kN	10461 kN	4933 kN	4913 kN	0.50	0.51	0.47	0.47	1.06	1.08
Armenia	0.43 kN	0.43 kN	0.44 kN	10461 kN	9939 kN	9989 kN	1.00	1.02	0.95	0.95	1.05	1.07
Armenia MCE	0.43 kN	0.65 kN	0.66 kN	10461 kN	14909 kN	14984 kN	1.50	1.53	1.43	1.43	1.05	1.07
Ibagué Cam La Pola Escalado	0.43 kN	0.72 kN	0.72 kN	10461 kN	16489.04 kN	16381.12 kN	1.67	1.68	1.58	1.57	1.06	1.07
Ibagué Gobernación Escalado	0.43 kN	0.42 kN	0.43 kN	10461 kN	9334.98 kN	10007.58 kN	0.97	1.00	0.89	0.96	1.08	1.04
Ibagué Col. Champagnat Escalado	0.43 kN	0.73 kN	0.74 kN	10461 kN	16624.21 kN	16556.81 kN	1.69	1.71	1.59	1.58	1.06	1.08
Ecuador	0.43 kN	0.58 kN	0.59 kN	10461 kN	13418 kN	13485 kN	1.35	1.38	1.28	1.29	1.05	1.07
Bolu	0.43 kN	0.87 kN	0.89 kN	10461 kN	20126 kN	20228 kN	2.03	2.07	1.92	1.93	1.05	1.07

Fuente: el Autor

La tabla 5-3, muestra los factores de normalización con el cortante en la base para el modelo estructural y el edificio de diseño de las oficinas y locales comerciales de 3 pisos con cada sismo al que fue sometido en el ensayo en la mesa sísmica, de acuerdo con el modelo matemático planteado por aceleraciones recibidas. Se observa que las cortantes se igualaron con una relación del 1 al 17%, lo cual nos dice que la aceleración recibida por el modelo estructural en la mesa sísmica representa en buena medida el edificio de diseño.

Tabla 5–3: Factor de Normalización del cortante del modelo estructural con el edificio de diseño para las oficinas y locales comerciales de 3 pisos con cada sismo

MODELO ESTRUCTURAL OFICINAS Y LOCALES COMERCIALES DE 3 PISOS												
SISMO	Modelo del Edificio			Edificio Diseñado - Construido			Normalización Modelo		Normalización Edificio Diseñado		Relación	
	Masa	Vs Eje X	Vs Eje Y	Masa	Vs Eje X	Vs Eje Y	EJE X	EJE Y	EJE X	EJE Y	EJE X	EJE Y
Ibagué Col. Carlos Lleras	0.27 kN	0.14 kN	0.13 kN	8952.00 kN	4301 kN	4175 kN	0.53	0.48	0.48	0.47	1.11	1.02
Ibagué Estación de Bomberos	0.27 kN	0.10 kN	0.08 kN	8952.00 kN	2787 kN	2597 kN	0.36	0.29	0.31	0.29	1.17	1.01
Ibagué Cam La Pola	0.27 kN	0.15 kN	0.13 kN	8952.00 kN	4529 kN	4537 kN	0.54	0.49	0.51	0.51	1.06	0.96
Ibagué Gobernación	0.27 kN	0.08 kN	0.06 kN	8952.00 kN	2234 kN	1929 kN	0.29	0.23	0.25	0.22	1.14	1.07
Ibagué Col. Champagnat	0.27 kN	0.13 kN	0.12 kN	8952.00 kN	4244 kN	3748 kN	0.48	0.45	0.47	0.42	1.01	1.08
Armenia	0.27 kN	0.24 kN	0.24 kN	8952.00 kN	8400 kN	8655 kN	0.88	0.90	0.94	0.97	0.94	0.93
Armenia MCE	0.27 kN	0.36 kN	0.36 kN	8952.00 kN	12600 kN	12983 kN	1.33	1.34	1.41	1.45	0.94	0.93
Ibagué Cam La Pola Escalado	0.27 kN	0.36 kN	0.32 kN	8952.00 kN	11096 kN	11116 kN	1.32	1.19	1.24	1.24	1.06	0.96
Ibagué Gobernación Escalado	0.27 kN	0.24 kN	0.19 kN	8952.00 kN	6992 kN	6038 kN	0.89	0.72	0.78	0.67	1.14	1.07
Ibagué Col. Champagnat Escalado	0.27 kN	0.38 kN	0.36 kN	8952.00 kN	12562 kN	11094 kN	1.42	1.33	1.40	1.24	1.01	1.08
Ecuador	0.27 kN	0.32 kN	0.33 kN	8952.00 kN	11340 kN	11684 kN	1.19	1.21	1.27	1.31	0.94	0.93
Bolu	0.27 kN	0.48 kN	0.49 kN	8952.00 kN	17010 kN	17526 kN	1.79	1.81	1.90	1.96	0.94	0.93

Fuente: el Autor

La tabla 5-4, muestra los factores de normalización con el cortante en la base para el modelo estructural y el edificio de diseño de la residencial de 5 pisos con cada sismo al que fue sometido en el ensayo en la mesa sísmica, de acuerdo con el modelo matemático planteado por aceleraciones recibidas. Se observa que las cortantes se igualaron con una relación del 1 al 12%, lo cual nos dice que la aceleración recibida por el modelo estructural en la mesa sísmica representa en buena medida el edificio de diseño.

Tabla 5-4: Factor de Normalización del cortante del modelo estructural con el edificio de diseño residencial de 5 pisos con cada sismo

MODELO ESTRUCTURAL RESIDENCIAL DE 5 PISOS												
SISMO	Modelo del Edificio			Edificio Diseñado - Construido			Normalización Modelo		Normalización Edificio		Relación	
	Masa	Vs Eje X	Vs Eje Y	Masa	Vs Eje X	Vs Eje Y	EJE X	EJE Y	EJE X	EJE Y	EJE X	EJE Y
Ibagué Col. Carlos Lleras	0.37 kN	0.20 kN	0.21 kN	3999.20 kN	2005.00 kN	2157.00 kN	0.54	0.57	0.50	0.54	1.08	1.06
Ibagué Estación de Bomberos	0.37 kN	0.11 kN	0.11 kN	3999.20 kN	1111.55 kN	1141.89 kN	0.29	0.30	0.28	0.29	1.06	1.06
Ibagué Cam La Pola	0.37 kN	0.21 kN	0.21 kN	3999.20 kN	2115.00 kN	2154.00 kN	0.57	0.57	0.53	0.54	1.07	1.05
Ibagué Gobernación	0.37 kN	0.10 kN	0.10 kN	3999.20 kN	998.00 kN	993.50 kN	0.27	0.27	0.25	0.25	1.08	1.09
Ibagué Col. Champagnat	0.37 kN	0.19 kN	0.18 kN	3999.20 kN	1897.00 kN	1826.00 kN	0.51	0.49	0.47	0.46	1.07	1.07
Armenia	0.37 kN	0.31 kN	0.42 kN	3999.20 kN	3475.00 kN	4071.00 kN	0.85	1.14	0.87	1.02	0.98	1.12
Armenia MCE	0.37 kN	0.47 kN	0.63 kN	3999.20 kN	5212.50 kN	6513.60 kN	1.27	1.71	1.30	1.63	0.98	1.05
Ibagué Cam La Pola Escalado	0.37 kN	0.46 kN	0.46 kN	3999.20 kN	4653.00 kN	4738.80 kN	1.25	1.25	1.16	1.18	1.07	1.05
Ibagué Gobernación Escalado	0.37 kN	0.28 kN	0.28 kN	3999.20 kN	2824.34 kN	2811.61 kN	0.76	0.76	0.71	0.70	1.08	1.09
Ibagué Col. Champagnat Escalado	0.37 kN	0.50 kN	0.48 kN	3999.20 kN	5102.93 kN	4911.94 kN	1.36	1.31	1.28	1.23	1.07	1.07
Ecuador	0.37 kN	0.39 kN	0.53 kN	3999.20 kN	4343.75 kN	5088.75 kN	1.06	1.42	1.09	1.27	0.98	1.12
Bolu	0.37 kN	0.58 kN	0.58 kN	3999.20 kN	5816.25 kN	5923.50 kN	1.56	1.56	1.45	1.48	1.07	1.05

Fuente: el Autor

Con los datos presentados de la relación entre cortantes de base para cada modelo estructural y su edificio de diseño, se procede comparar la cortante de piso de cada modelo estructural producida por cada sismo en los ensayos en mesa sísmica para caracterizar el comportamiento dinámico de los edificios de diseño con su respectiva cortante cumpliendo NSR 10 como se muestra en el capítulo 3.2 (Selección de los modelos estructurales).

La tabla 5-5, muestra la cortante de piso normalizada por cada sismo de Ibagué, Armenia y los de la FEMA ingresados en la mesa sísmica para el modelo estructural de la institución educativa de 3 pisos comparado con la cortante de diseño por piso cumpliendo norma NSR 10 del edificio de diseño.

Tabla 5–5: Cortante de piso por cada sismo del modelo estructural del Institución educativa de 3 pisos normalizada comparada con la cortante de diseño por piso del edificio de diseño

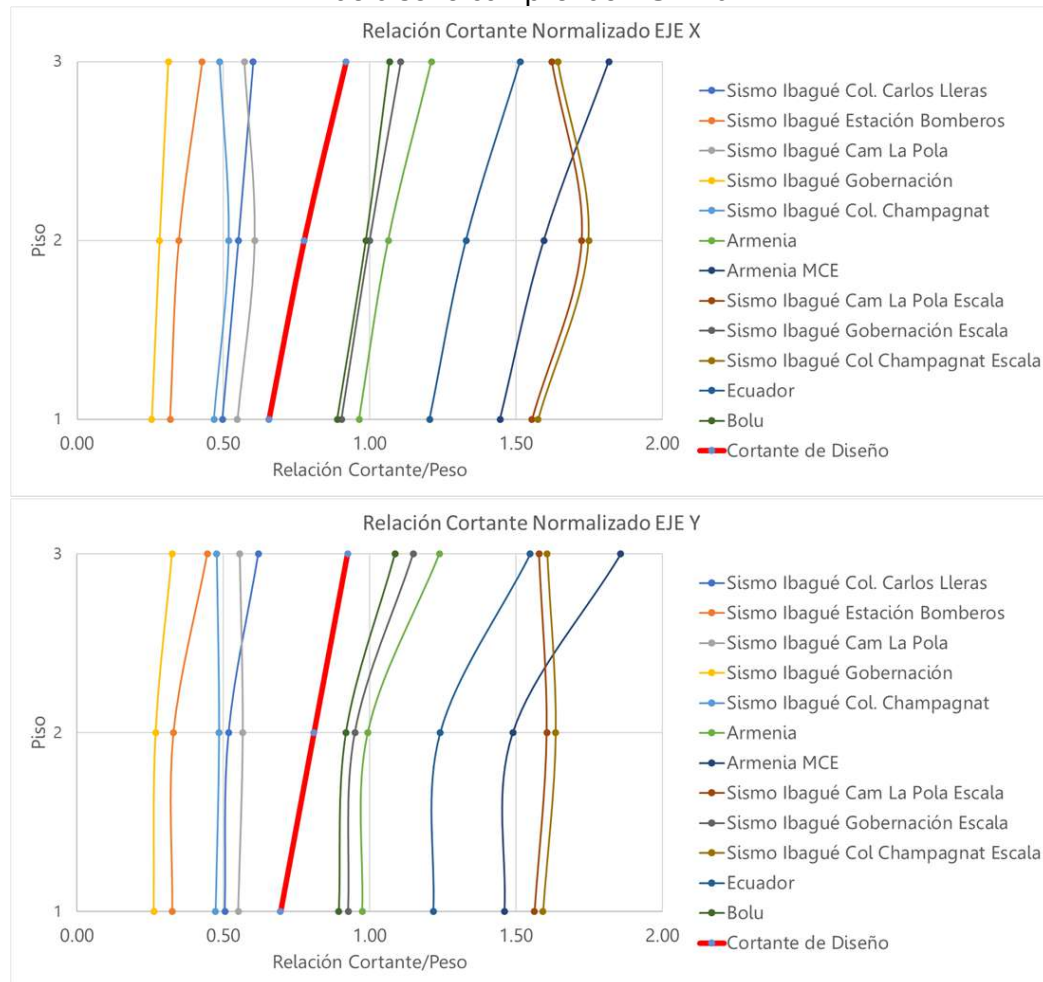
MODELO ESTRUCTURAL INSTITUCIÓN EDUCATIVA DE 3 PISOS - CORTANTE DE PISO											
Sismo	Piso	Masa	Edificio Diseñado - Cortante		Relación Cortante/Masa		Masa	Modelo Estructural - Cortante		Relación Cortante/Masa	
			Vs Eje X	Vs Eje Y	EJE X	EJE Y		Vs Eje X	Vs Eje Y	EJE X	EJE Y
Ibagué Col. Carlos Lleras	1	10305 kN	6752 kN	7160 kN	0.66	0.69	0.44 kN	0.218 kN	0.221 kN	0.50	0.50
	2	7440 kN	5766 kN	6020 kN	0.78	0.81	0.32 kN	0.177 kN	0.167 kN	0.55	0.52
	3	3720 kN	3417 kN	3438 kN	0.92	0.92	0.16 kN	0.097 kN	0.100 kN	0.60	0.62
Ibagué Estación de Bomberos	1	10305 kN	6752 kN	7160 kN	0.66	0.69	0.44 kN	0.139 kN	0.142 kN	0.32	0.32
	2	7440 kN	5766 kN	6020 kN	0.78	0.81	0.32 kN	0.112 kN	0.106 kN	0.35	0.33
	3	3720 kN	3417 kN	3438 kN	0.92	0.92	0.16 kN	0.069 kN	0.072 kN	0.43	0.44
Ibagué Cam La Pola	1	10305 kN	6752 kN	7160 kN	0.66	0.69	0.44 kN	0.240 kN	0.241 kN	0.55	0.55
	2	7440 kN	5766 kN	6020 kN	0.78	0.81	0.32 kN	0.195 kN	0.182 kN	0.61	0.56
	3	3720 kN	3417 kN	3438 kN	0.92	0.92	0.16 kN	0.092 kN	0.089 kN	0.57	0.56
Ibagué Gobernación	1	10305 kN	6752 kN	7160 kN	0.66	0.69	0.44 kN	0.112 kN	0.115 kN	0.26	0.26
	2	7440 kN	5766 kN	6020 kN	0.78	0.81	0.32 kN	0.091 kN	0.086 kN	0.28	0.27
	3	3720 kN	3417 kN	3438 kN	0.92	0.92	0.16 kN	0.050 kN	0.052 kN	0.31	0.32
Ibagué Col. Champagnat	1	10305 kN	6752 kN	7160 kN	0.66	0.69	0.44 kN	0.205 kN	0.207 kN	0.47	0.47
	2	7440 kN	5766 kN	6020 kN	0.78	0.81	0.32 kN	0.167 kN	0.156 kN	0.52	0.48
	3	3720 kN	3417 kN	3438 kN	0.92	0.92	0.16 kN	0.078 kN	0.077 kN	0.49	0.48
Armenia	1	10305 kN	6752 kN	7160 kN	0.66	0.69	0.44 kN	0.422 kN	0.426 kN	0.96	0.97
	2	7440 kN	5766 kN	6020 kN	0.78	0.81	0.32 kN	0.342 kN	0.320 kN	1.06	0.99
	3	3720 kN	3417 kN	3438 kN	0.92	0.92	0.16 kN	0.195 kN	0.199 kN	1.21	1.24
Armenia MCE	1	10305 kN	6752 kN	7160 kN	0.66	0.69	0.44 kN	0.633 kN	0.640 kN	1.44	1.46
	2	7440 kN	5766 kN	6020 kN	0.78	0.81	0.32 kN	0.513 kN	0.479 kN	1.59	1.49
	3	3720 kN	3417 kN	3438 kN	0.92	0.92	0.16 kN	0.292 kN	0.299 kN	1.82	1.86
Ibagué Cam La Pola Escalado	1	10305 kN	6752 kN	7160 kN	0.66	0.69	0.44 kN	0.680 kN	0.684 kN	1.55	1.56
	2	7440 kN	5766 kN	6020 kN	0.78	0.81	0.32 kN	0.555 kN	0.517 kN	1.72	1.60
	3	3720 kN	3417 kN	3438 kN	0.92	0.92	0.16 kN	0.261 kN	0.254 kN	1.62	1.58
Ibagué Gobernación Escalado	1	10305 kN	6752 kN	7160 kN	0.66	0.69	0.44 kN	0.395 kN	0.406 kN	0.90	0.93
	2	7440 kN	5766 kN	6020 kN	0.78	0.81	0.32 kN	0.322 kN	0.306 kN	1.00	0.95
	3	3720 kN	3417 kN	3438 kN	0.92	0.92	0.16 kN	0.178 kN	0.185 kN	1.11	1.15
Ibagué Col. Champagnat Escalado	1	10305 kN	6752 kN	7160 kN	0.66	0.69	0.44 kN	0.690 kN	0.697 kN	1.57	1.59
	2	7440 kN	5766 kN	6020 kN	0.78	0.81	0.32 kN	0.563 kN	0.526 kN	1.75	1.63
	3	3720 kN	3417 kN	3438 kN	0.92	0.92	0.16 kN	0.264 kN	0.259 kN	1.64	1.61
Ecuador	1	10305 kN	6752 kN	7160 kN	0.66	0.69	0.44 kN	0.527 kN	0.533 kN	1.20	1.22
	2	7440 kN	5766 kN	6020 kN	0.78	0.81	0.32 kN	0.428 kN	0.399 kN	1.33	1.24
	3	3720 kN	3417 kN	3438 kN	0.92	0.92	0.16 kN	0.244 kN	0.249 kN	1.51	1.55
Bolu	1	10305 kN	6752 kN	7160 kN	0.66	0.69	0.44 kN	0.389 kN	0.392 kN	0.89	0.89
	2	7440 kN	5766 kN	6020 kN	0.78	0.81	0.32 kN	0.318 kN	0.296 kN	0.99	0.92
	3	3720 kN	3417 kN	3438 kN	0.92	0.92	0.16 kN	0.172 kN	0.175 kN	1.07	1.09

Fuente: el Autor

En la figura 5-1, se muestra de forma gráfica la comparación de la cortante normalizada por cada sismo para la Institución educativa de 3 pisos ensayado en la mesa sísmica, donde se puede observar que los sismos de Ibagué Col. Carlos Lleras, Estación de Bomberos, Cam la Pola, Gobernación y Col. Champagnat no producen una aceleración que sobrepase la capacidad por cortante de piso de diseño del edificio de la institución educativa de 3 pisos. Sin embargo, en caso de recibir los sismos de Ibagué escalados, si se podría presentar excedencia de llegar a tener Cam la Pola Escalado, Gobernación

Escalado y Col. Champagnat Escalado. Respecto a la fuente cercana se aprecia que de tener el sismo de Armenia de 1999 y la máxima esperada se presentaría excedencia en la cortante de diseño por piso y por último con el sismo del Ecuador 2016 y Bolu Turquía 1999 se puede decir que el diseño no soportaría tal aceleración recibida.

Figura 5–1: Cortante normalizada por cada sismo en el modelo estructural de la Institución educativa de 3 pisos comparada con la cortante de diseño por piso del edificio de diseño cumpliendo NSR 10



Fuente: el Autor

La tabla 5-6, muestra la cortante de piso normalizada por cada sismo de Ibagué, Armenia y los de la FEMA ingresados en la mesa sísmica para el modelo estructural oficinas y locales comerciales de 3 pisos comparado con la cortante de diseño por piso cumpliendo norma NSR 10 del edificio de diseño.

Tabla 5–6: Cortante de piso por cada sismo del modelo estructural de oficinas y locales comerciales de 3 pisos normalizada comparada con la cortante de diseño por piso del edificio de diseño.

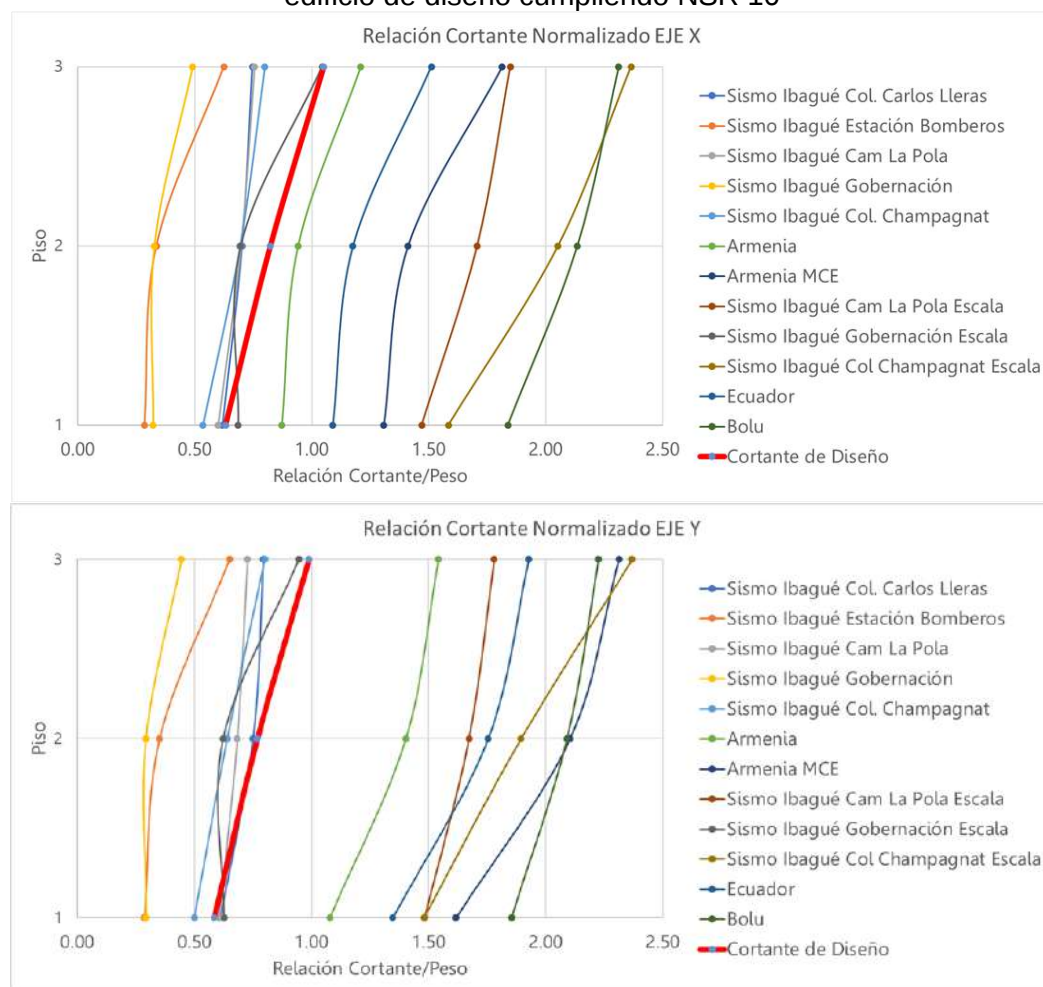
MODELO ESTRUCTURAL OFICINAS Y LOCALES DE 3 PISOS - CORTANTE DE PISO											
Sismo	Piso	Masa	Edificio Diseñado - Cortante		Relación Cortante/Masa		Masa	Modelo Estructural - Cortante		Relación Cortante/Masa	
			Vs Eje X	Vs Eje Y	EJE X	EJE Y		Vs Eje X	Vs Eje Y	EJE X	EJE Y
Ibagué Col. Carlos Lleras	1	8707 kN	5500 kN	5083 kN	0.63	0.58	0.27 kN	0.156 kN	0.133 kN	0.58	0.50
	2	5594 kN	4605 kN	4298 kN	0.82	0.77	0.18 kN	0.127 kN	0.109 kN	0.72	0.61
	3	2481 kN	2608 kN	2454 kN	1.05	0.99	0.09 kN	0.076 kN	0.067 kN	0.85	0.75
Ibagué Estación de	1	8707 kN	5500 kN	5083 kN	0.63	0.58	0.27 kN	0.108 kN	0.085 kN	0.40	0.32
	2	5594 kN	4605 kN	4298 kN	0.82	0.77	0.18 kN	0.087 kN	0.068 kN	0.49	0.38
	3	2481 kN	2608 kN	2454 kN	1.05	0.99	0.09 kN	0.056 kN	0.046 kN	0.63	0.52
Ibagué Cam La Pola	1	8707 kN	5500 kN	5083 kN	0.63	0.58	0.27 kN	0.159 kN	0.140 kN	0.60	0.52
	2	5594 kN	4605 kN	4298 kN	0.82	0.77	0.18 kN	0.130 kN	0.116 kN	0.73	0.65
	3	2481 kN	2608 kN	2454 kN	1.05	0.99	0.09 kN	0.077 kN	0.070 kN	0.86	0.79
Ibagué Gobernación	1	8707 kN	5500 kN	5083 kN	0.63	0.58	0.27 kN	0.084 kN	0.066 kN	0.32	0.25
	2	5594 kN	4605 kN	4298 kN	0.82	0.77	0.18 kN	0.069 kN	0.057 kN	0.39	0.32
	3	2481 kN	2608 kN	2454 kN	1.05	0.99	0.09 kN	0.041 kN	0.034 kN	0.46	0.38
Ibagué Col. Champagnat	1	8707 kN	5500 kN	5083 kN	0.63	0.58	0.27 kN	0.141 kN	0.130 kN	0.53	0.49
	2	5594 kN	4605 kN	4298 kN	0.82	0.77	0.18 kN	0.116 kN	0.106 kN	0.65	0.59
	3	2481 kN	2608 kN	2454 kN	1.05	0.99	0.09 kN	0.068 kN	0.067 kN	0.77	0.75
Armenia	1	8707 kN	5500 kN	5083 kN	0.63	0.58	0.27 kN	0.261 kN	0.258 kN	0.98	0.96
	2	5594 kN	4605 kN	4298 kN	0.82	0.77	0.18 kN	0.212 kN	0.211 kN	1.19	1.19
	3	2481 kN	2608 kN	2454 kN	1.05	0.99	0.09 kN	0.131 kN	0.133 kN	1.47	1.49
Armenia MCE	1	8707 kN	5500 kN	5083 kN	0.63	0.58	0.27 kN	0.392 kN	0.386 kN	1.47	1.45
	2	5594 kN	4605 kN	4298 kN	0.82	0.77	0.18 kN	0.318 kN	0.316 kN	1.79	1.78
	3	2481 kN	2608 kN	2454 kN	1.05	0.99	0.09 kN	0.196 kN	0.199 kN	2.21	2.24
Ibagué Cam La Pola	1	8707 kN	5500 kN	5083 kN	0.63	0.58	0.27 kN	0.207 kN	0.182 kN	0.77	0.68
	2	5594 kN	4605 kN	4298 kN	0.82	0.77	0.18 kN	0.169 kN	0.151 kN	0.95	0.85
	3	2481 kN	2608 kN	2454 kN	1.05	0.99	0.09 kN	0.100 kN	0.091 kN	1.12	1.02
Ibagué Gobernación	1	8707 kN	5500 kN	5083 kN	0.63	0.58	0.27 kN	0.109 kN	0.086 kN	0.41	0.32
	2	5594 kN	4605 kN	4298 kN	0.82	0.77	0.18 kN	0.089 kN	0.071 kN	0.50	0.40
	3	2481 kN	2608 kN	2454 kN	1.05	0.99	0.09 kN	0.054 kN	0.044 kN	0.60	0.49
Ibagué Col. Champagnat	1	8707 kN	5500 kN	5083 kN	0.63	0.58	0.27 kN	0.184 kN	0.168 kN	0.69	0.63
	2	5594 kN	4605 kN	4298 kN	0.82	0.77	0.18 kN	0.151 kN	0.139 kN	0.85	0.78
	3	2481 kN	2608 kN	2454 kN	1.05	0.99	0.09 kN	0.089 kN	0.084 kN	1.00	0.95
Ecuador	1	8707 kN	5500 kN	5083 kN	0.63	0.58	0.27 kN	0.326 kN	0.322 kN	1.22	1.21
	2	5594 kN	4605 kN	4298 kN	0.82	0.77	0.18 kN	0.265 kN	0.264 kN	1.49	1.48
	3	2481 kN	2608 kN	2454 kN	1.05	0.99	0.09 kN	0.164 kN	0.166 kN	1.84	1.87
Bolu	1	8707 kN	5500 kN	5083 kN	0.63	0.58	0.27 kN	0.258 kN	0.228 kN	0.97	0.85
	2	5594 kN	4605 kN	4298 kN	0.82	0.77	0.18 kN	0.212 kN	0.188 kN	1.19	1.06
	3	2481 kN	2608 kN	2454 kN	1.05	0.99	0.09 kN	0.125 kN	0.114 kN	1.40	1.28

Fuente: el Autor

En la figura 5-2, se muestra de forma gráfica la comparación de la cortante normalizada por cada sismo para el modelo estructural de oficinas y locales comerciales de 3 pisos ensayado en la mesa sísmica. Respecto a la cortante de diseño cumpliendo NSR 10, se puede observar que para los sismos de Ibagué Estación de Bomberos, Cam la Pola, Gobernación y Col. Champagnat no se produce una aceleración que sobrepase la capacidad por cortante de piso, con el sismo de Ibagué Col. Carlos Lleras en la dirección del eje Y se observa que sobrepasa en la base el cortante de diseño, si se llegara a presentar es importante revisar dentro de los parámetros estructurales del edificio los

elementos de resistencia en su base. De recibir los sismos de Ibagué escalados observamos que se presenta excedencia con Cam la Pola Escalado, Gobernación Escalado y Col. Champagnat Escalado. Con el sismo de Armenia de 1999 y la máxima esperada se presentaría a futuro una excedencia en la cortante utilizada para el diseño d y por último con el sismo del Ecuador 2016 y Bolu Turquía 1999 es posible que se produzca una excedencia en la limitaciones de diseño por cortante.

Figura 5–2: Cortante normalizada por cada sismo en el modelo estructural de las oficinas y locales comerciales de 3 pisos comparada con la cortante de diseño por piso del edificio de diseño cumpliendo NSR 10



Fuente: el Autor

La tabla 5-7, muestra la cortante de piso normalizada por cada sismo de Ibagué, Armenia y los de la FEMA ingresados en la mesa sísmica para el modelo estructural residencial de 5 pisos comparado con la cortante de diseño por piso cumpliendo norma NSR 10 del edificio de diseño.

Tabla 5–7: Cortante de piso por cada sismo del modelo estructural residencial de 5 pisos normalizada comparada con la cortante de diseño por piso del edificio de diseño

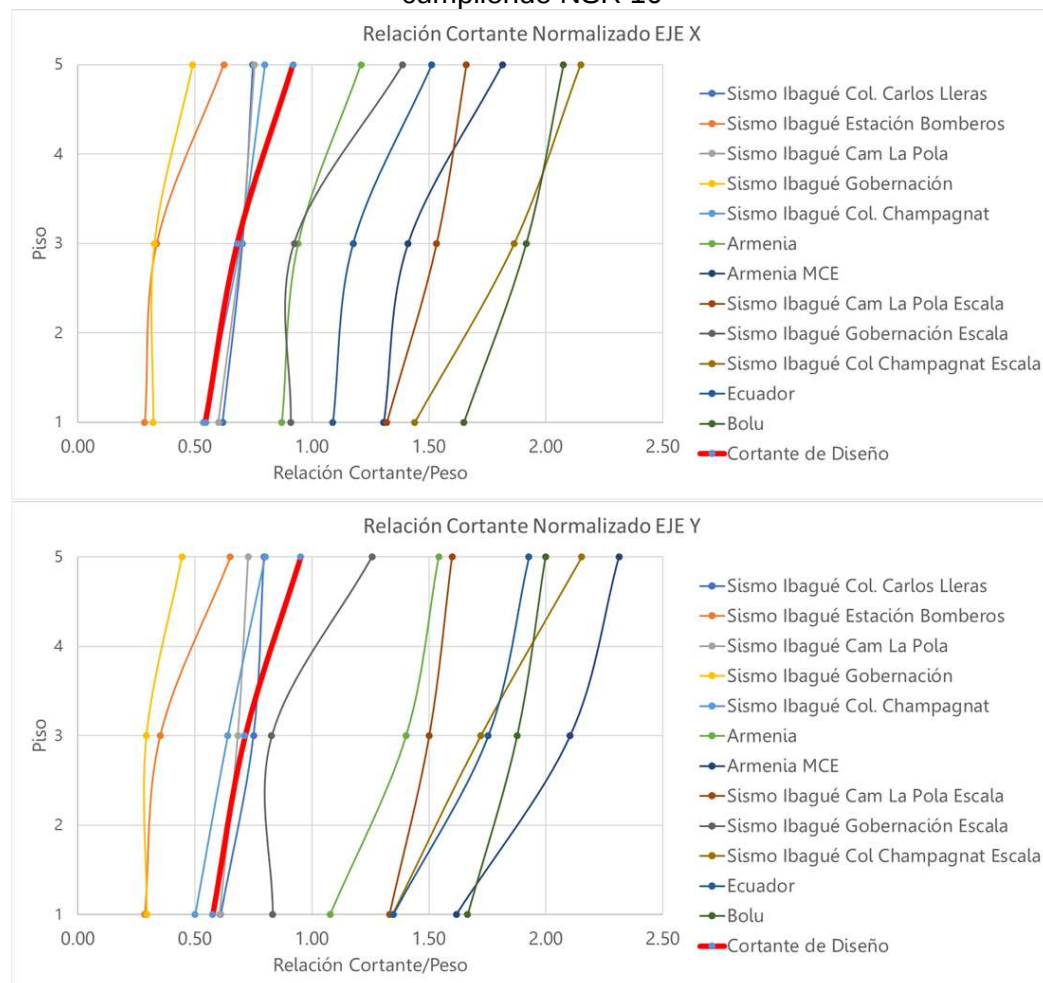
MODELO ESTRUCTURAL RESIDENCIAL DE 5 PISOS - CORTANTE DE PISO											
Sismo	Piso	Masa	Edificio Diseñado - Cortante		Relación Cortante/Masa		Masa	Modelo Estructural - Cortante		Relación Cortante/Masa	
			Vs Eje X	Vs Eje Y	EJE X	EJE Y		Vs Eje X	Vs Eje Y	EJE X	EJE Y
Ibagué Col. Carlos Lleras	1	3999.0 kN	2184 kN	2299 kN	0.55	0.57	0.37 kN	0.229 kN	0.226 kN	0.62	0.61
	3	2507.320 kN	1709 kN	1789 kN	0.68	0.71	0.23 kN	0.158 kN	0.169 kN	0.70	0.75
	5	655.800 kN	603 kN	624 kN	0.92	0.95	0.08 kN	0.056 kN	0.060 kN	0.75	0.79
Ibagué Estación de Bomberos	1	3999.0 kN	2184 kN	2299 kN	0.55	0.57	0.37 kN	0.106 kN	0.106 kN	0.29	0.29
	3	2507.320 kN	1709 kN	1789 kN	0.68	0.71	0.23 kN	0.076 kN	0.079 kN	0.34	0.35
	5	655.800 kN	603 kN	624 kN	0.92	0.95	0.08 kN	0.047 kN	0.049 kN	0.62	0.65
Ibagué Cam La Pola	1	3999.0 kN	2184 kN	2299 kN	0.55	0.57	0.37 kN	0.222 kN	0.224 kN	0.60	0.61
	3	2507.320 kN	1709 kN	1789 kN	0.68	0.71	0.23 kN	0.157 kN	0.154 kN	0.70	0.68
	5	655.800 kN	603 kN	624 kN	0.92	0.95	0.08 kN	0.057 kN	0.055 kN	0.75	0.73
Ibagué Gobernación	1	3999.0 kN	2184 kN	2299 kN	0.55	0.57	0.37 kN	0.119 kN	0.109 kN	0.32	0.29
	3	2507.320 kN	1709 kN	1789 kN	0.68	0.71	0.23 kN	0.073 kN	0.066 kN	0.33	0.29
	5	655.800 kN	603 kN	624 kN	0.92	0.95	0.08 kN	0.037 kN	0.033 kN	0.49	0.44
Ibagué Col. Champagnat	1	3999.0 kN	2184 kN	2299 kN	0.55	0.57	0.37 kN	0.198 kN	0.185 kN	0.54	0.50
	3	2507.320 kN	1709 kN	1789 kN	0.68	0.71	0.23 kN	0.156 kN	0.144 kN	0.69	0.64
	5	655.800 kN	603 kN	624 kN	0.92	0.95	0.08 kN	0.060 kN	0.060 kN	0.80	0.80
Armenia	1	3999.0 kN	2184 kN	2299 kN	0.55	0.57	0.37 kN	0.322 kN	0.399 kN	0.87	1.08
	3	2507.320 kN	1709 kN	1789 kN	0.68	0.71	0.23 kN	0.212 kN	0.316 kN	0.94	1.40
	5	655.800 kN	603 kN	624 kN	0.92	0.95	0.08 kN	0.091 kN	0.116 kN	1.21	1.54
Armenia MCE	1	3999.0 kN	2184 kN	2299 kN	0.55	0.57	0.37 kN	0.484 kN	0.598 kN	1.31	1.62
	3	2507.320 kN	1709 kN	1789 kN	0.68	0.71	0.23 kN	0.317 kN	0.473 kN	1.41	2.10
	5	655.800 kN	603 kN	624 kN	0.92	0.95	0.08 kN	0.136 kN	0.173 kN	1.81	2.31
Ibagué Cam La Pola Escalado	1	3999.0 kN	2184 kN	2299 kN	0.55	0.57	0.37 kN	0.488 kN	0.493 kN	1.32	1.33
	3	2507.320 kN	1709 kN	1789 kN	0.68	0.71	0.23 kN	0.345 kN	0.338 kN	1.53	1.50
	5	655.800 kN	603 kN	624 kN	0.92	0.95	0.08 kN	0.125 kN	0.120 kN	1.66	1.60
Ibagué Gobernación Escalado	1	3999.0 kN	2184 kN	2299 kN	0.55	0.57	0.37 kN	0.337 kN	0.308 kN	0.91	0.83
	3	2507.320 kN	1709 kN	1789 kN	0.68	0.71	0.23 kN	0.208 kN	0.186 kN	0.92	0.83
	5	655.800 kN	603 kN	624 kN	0.92	0.95	0.08 kN	0.104 kN	0.094 kN	1.39	1.26
Ibagué Col. Champagnat Escalado	1	3999.0 kN	2184 kN	2299 kN	0.55	0.57	0.37 kN	0.533 kN	0.498 kN	1.44	1.35
	3	2507.320 kN	1709 kN	1789 kN	0.68	0.71	0.23 kN	0.420 kN	0.387 kN	1.87	1.72
	5	655.800 kN	603 kN	624 kN	0.92	0.95	0.08 kN	0.161 kN	0.161 kN	2.15	2.15
Ecuador	1	3999.0 kN	2184 kN	2299 kN	0.55	0.57	0.37 kN	0.403 kN	0.498 kN	1.09	1.35
	3	2507.320 kN	1709 kN	1789 kN	0.68	0.71	0.23 kN	0.265 kN	0.395 kN	1.18	1.75
	5	655.800 kN	603 kN	624 kN	0.92	0.95	0.08 kN	0.113 kN	0.145 kN	1.51	1.93
Bolu	1	3999.0 kN	2184 kN	2299 kN	0.55	0.57	0.37 kN	0.611 kN	0.616 kN	1.65	1.66
	3	2507.320 kN	1709 kN	1789 kN	0.68	0.71	0.23 kN	0.431 kN	0.422 kN	1.92	1.88
	5	655.800 kN	603 kN	624 kN	0.92	0.95	0.08 kN	0.156 kN	0.150 kN	2.08	2.00

Fuente: el Autor

En la figura 5-3, se muestra de forma gráfica la comparación de la cortante normalizada por cada sismo para el modelo estructural residencial de 5 pisos ensayado en la mesa sísmica, donde se observa que para los sismos de Ibagué Estación de Bomberos y Gobernación no se produce una aceleración que sobrepase la capacidad por cortante del diseño. Para el sismo de Ibagué Col. Carlos Lleras, Cam la Pola y Col. Champagnat se presenta la posibilidad de que el cortante de diseño sea excedido lo que hace importante generar revisión de sus elementos estructurales tanto en su base como en pisos superiores. Con la probabilidad futura de recibir los sismos de Ibagué escalados Cam la Pola Escalado, Gobernación Escalado y Col. Champagnat Escalado estos generarían

aceleraciones que sobrepasarían los límites de diseño por cortante establecidos para el edificio. Con el sismo de Armenia de 1999 y la máxima esperada se presentaría a futuro una excedencia en la cortante utilizada para el diseño d y por último con el sismo del ecuador 2016 y Bolu Turquía 1999 es posible que se produzca una excedencia en las limitaciones de diseño por cortante

Figura 5–3: Cortante normalizada por cada sismo en el modelo estructural residencial bifamiliar de 5 pisos comparada con la cortante de diseño por piso del edificio de diseño cumpliendo NSR 10



Fuente: el Autor

Sabiendo que el modelo estructural si caracteriza en gran medida el edificio de diseño, se presenta a continuación datos referentes a la relación de derivas en donde se tomaron datos obtenidos en los ensayos en la mesa sísmica con cada sismo en cada dirección de análisis para cada modelo estructural, para evidenciar que podría llegar a suceder en los edificios seleccionados. Es de resaltar que la deriva es un numero adimensional que

representa el desplazamiento probable que puede tener frente a un empuje lateral (cortante de piso). Con los resultados tomados del ensayo, se generaron unas tablas que muestran la relación de derivas entre los edificios de diseño con los modelos estructurales caracterizados mediante la normalización por aceleración recibida.

La tabla 5-8, muestra la relación entre las derivas obtenidas para el modelo estructural de la institución educativa de tres pisos en la mesa sísmica con cada sismo en términos absolutos respecto a las derivas de diseño cumpliendo norma NSR 10 del edificio de diseño.

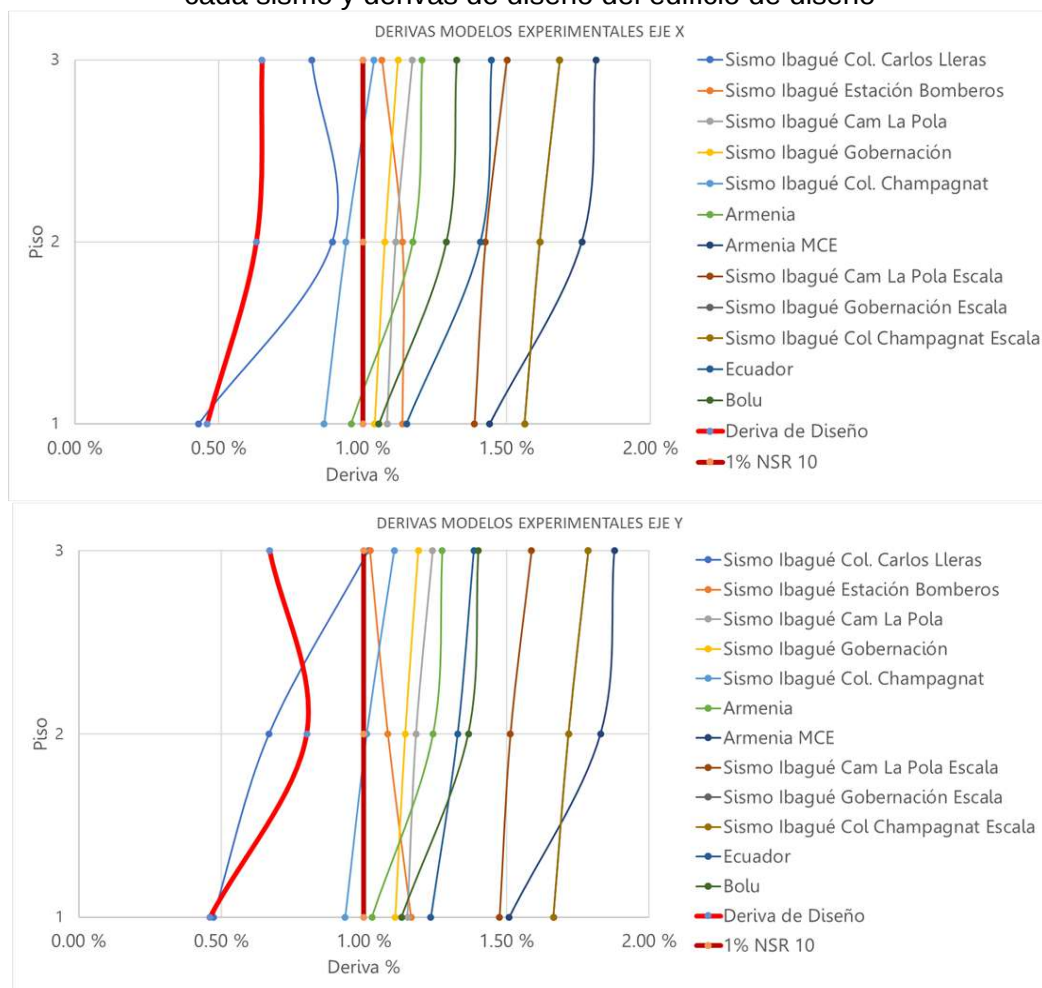
Tabla 5–8: Relación de derivas entre el modelo estructural de la institución educativa de tres pisos y el edificio de diseño

MODELO ESTRUCTURAL INSTITUCIÓN EDUCATIVA DE 3 PISOS - DERIVA							
SISMO	PISO	Modelo Estructural		Edificio de Diseño		Relación Deriva	
		Deriva Eje X	Deriva Eje Y	Deriva Eje X	Deriva Eje Y	EJE X	EJE Y
Ibagué Col. Carlos Lleras	1	0.43 %	0.47 %	0.46 %	0.46 %	0.94	1.03
	2	0.90 %	0.67 %	0.63 %	0.80 %	1.42	0.84
	3	0.82 %	1.02 %	0.65 %	0.67 %	1.27	1.52
Ibagué Estación de Bomberos	1	1.14 %	1.17 %	0.46 %	0.46 %	2.48	2.53
	2	1.14 %	1.08 %	0.63 %	0.80 %	1.81	1.36
	3	1.07 %	1.02 %	0.65 %	0.67 %	1.64	1.52
Ibagué Cam La Pola	1	1.09 %	1.15 %	0.46 %	0.46 %	2.36	2.51
	2	1.11 %	1.18 %	0.63 %	0.80 %	1.77	1.48
	3	1.17 %	1.24 %	0.65 %	0.67 %	1.80	1.85
Ibagué Gobernación	1	1.04 %	1.11 %	0.46 %	0.46 %	2.27	2.41
	2	1.08 %	1.14 %	0.63 %	0.80 %	1.71	1.43
	3	1.12 %	1.19 %	0.65 %	0.67 %	1.73	1.78
Ibagué Col. Champagnat	1	0.87 %	0.93 %	0.46 %	0.46 %	1.88	2.03
	2	0.94 %	1.01 %	0.63 %	0.80 %	1.50	1.26
	3	1.04 %	1.11 %	0.65 %	0.67 %	1.60	1.65
Armenia	1	0.96 %	1.03 %	0.46 %	0.46 %	2.09	2.24
	2	1.17 %	1.24 %	0.63 %	0.80 %	1.86	1.55
	3	1.21 %	1.27 %	0.65 %	0.67 %	1.86	1.90
Armenia MCE	1	1.44 %	1.51 %	0.46 %	0.46 %	3.13	3.28
	2	1.76 %	1.83 %	0.63 %	0.80 %	2.80	2.29
	3	1.81 %	1.88 %	0.65 %	0.67 %	2.78	2.80

Ibagué Cam La Pola Escalado	1	1.39 %	1.48 %	0.46 %	0.46 %	3.02	3.21
	2	1.43 %	1.51 %	0.63 %	0.80 %	2.27	1.89
	3	1.50 %	1.59 %	0.65 %	0.67 %	2.31	2.37
Ibagué Gobernación Escalado	1	1.56 %	1.66 %	0.46 %	0.46 %	3.40	3.62
	2	1.62 %	1.72 %	0.63 %	0.80 %	2.56	2.15
	3	1.68 %	1.79 %	0.65 %	0.67 %	2.59	2.67
Ibagué Col. Champagnat Escalado	1	1.24 %	1.33 %	0.46 %	0.46 %	2.69	2.90
	2	1.35 %	1.44 %	0.63 %	0.80 %	2.14	1.80
	3	1.49 %	1.58 %	0.65 %	0.67 %	2.29	2.36
Ecuador	1	1.15 %	1.23 %	0.46 %	0.46 %	2.51	2.68
	2	1.41 %	1.33 %	0.63 %	0.80 %	2.24	1.66
	3	1.45 %	1.39 %	0.65 %	0.67 %	2.23	2.07
Bolu	1	1.06 %	1.13 %	0.46 %	0.46 %	2.30	2.46
	2	1.29 %	1.37 %	0.63 %	0.80 %	2.05	1.71
	3	1.33 %	1.40 %	0.65 %	0.67 %	2.04	2.09

Fuente: el Autor

En la figura 5-4, se muestran las derivas del modelo estructural de la institución educativa de 3 pisos por cada sismo ensayado en la mesa sísmica y las derivas del edificio de diseño. Se observa que de ocurrir los sismos de Ibagué Estación de Bomberos, Cam la Pola, Gobernación y Col. Champagnat tanto en dirección X como en dirección Y presentan desplazamientos que exceden los parámetros de diseño del edificio que pueden llegar a ocasionar daños en elementos estructurales que afecten las condiciones de servicio, con el sismo Col. Carlos Lleras en el sentido del eje Y, en su piso intermedio se observa que no excede las derivas de diseño sin embargo en pisos superiores si se presentan grandes desplazamientos. Si se llegaran a presentar sismos de Ibagué escalados estos presentarían en el edificio desplazamientos que excede las condiciones límites de diseño colocadas por tanto es importante revisar que posibles daños se presentarían a nivel estructural. Para condiciones del sismo de Armenia 1999 y el máximo esperado se evidencia excedencia en el límite de diseño lo que a futuro puede comprometer la estabilidad del edificio, y con sismos como el del ecuador 2016 y Bolu 1999, probablemente evidenciaran desplazamientos que generen daños a nivel estructural que comprometa la estabilidad y seguridad del edificio y sus ocupantes. Por último, de presentar ajustes que lleven las derivas de diseño a un 1%, podríamos decir que de ocurrir sismos como Col. Carlos Lleras y Col. Champagnat las limitaciones de diseño no serían excedidas.

Figura 5-4: Derivas del modelo estructural de la institución educativa de tres pisos por cada sismo y derivas de diseño del edificio de diseño

Fuente: el Autor

La tabla 5-8, muestra la relación entre las derivas obtenidas para el modelo estructural de las Oficinas y Locales comerciales de tres pisos en la mesa sísmica con cada sismo en términos absolutos respecto a las derivas de diseño cumpliendo norma NSR 10 del edificio de diseño.

Tabla 5-9: Relación de derivas entre el modelo estructural de las Oficinas y Locales comerciales de tres pisos y el edificio de diseño

MODELO ESTRUCTURAL OFICINAS Y LOCALES DE 3 PISOS - DERIVA							
SISMO	PISO	Modelo Estructural		Edificio de Diseño		Relación Deriva	
		Deriva Eje X	Deriva Eje Y	Deriva Eje X	Deriva Eje Y	EJE X	EJE Y
Ibagué Col. Carlos Lleras	1	0.99 %	0.93 %	0.40 %	0.58 %	2.47	1.61
	2	1.16 %	1.11 %	0.90 %	0.90 %	1.29	1.23
	3	1.14 %	1.09 %	0.74 %	0.74 %	1.54	1.47

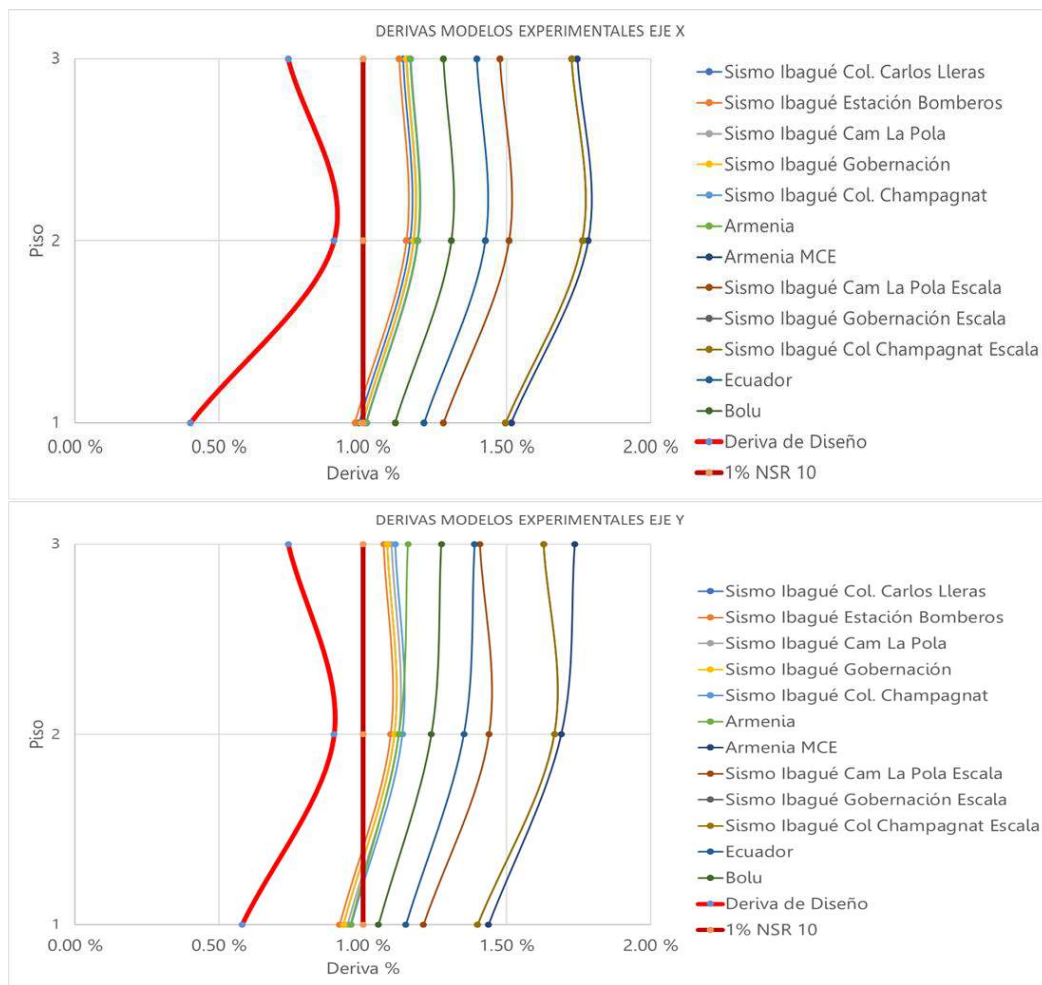
Ibagué Estación de Bomberos	1	0.97 %	0.92 %	0.40 %	0.58 %	2.43	1.58
	2	1.15 %	1.10 %	0.90 %	0.90 %	1.28	1.22
	3	1.13 %	1.07 %	0.74 %	0.74 %	1.52	1.45
Ibagué Cam La Pola	1	1.00 %	0.95 %	0.40 %	0.58 %	2.50	1.63
	2	1.18 %	1.12 %	0.90 %	0.90 %	1.31	1.25
	3	1.15 %	1.10 %	0.74 %	0.74 %	1.56	1.48
Ibagué Gobernación	1	1.00 %	0.93 %	0.40 %	0.58 %	2.49	1.61
	2	1.18 %	1.11 %	0.90 %	0.90 %	1.31	1.23
	3	1.15 %	1.09 %	0.74 %	0.74 %	1.55	1.47
Ibagué Col. Champagnat	1	1.01 %	0.96 %	0.40 %	0.58 %	2.53	1.65
	2	1.19 %	1.14 %	0.90 %	0.90 %	1.32	1.26
	3	1.17 %	1.11 %	0.74 %	0.74 %	1.58	1.50
Armenia	1	1.01 %	0.96 %	0.40 %	0.58 %	2.53	1.65
	2	1.19 %	1.13 %	0.90 %	0.90 %	1.32	1.25
	3	1.16 %	1.16 %	0.74 %	0.74 %	1.57	1.56
Armenia MCE	1	1.52 %	1.44 %	0.40 %	0.58 %	3.79	2.48
	2	1.78 %	1.69 %	0.90 %	0.90 %	1.98	1.88
	3	1.75 %	1.74 %	0.74 %	0.74 %	2.36	2.34
Ibagué Cam La Pola Escalado	1	1.28 %	1.21 %	0.40 %	0.58 %	3.20	2.09
	2	1.51 %	1.44 %	0.90 %	0.90 %	1.67	1.60
	3	1.48 %	1.41 %	0.74 %	0.74 %	1.99	1.90
Ibagué Gobernación Escalado	1	1.50 %	1.40 %	0.40 %	0.58 %	3.74	2.41
	2	1.76 %	1.67 %	0.90 %	0.90 %	1.96	1.85
	3	1.73 %	1.63 %	0.74 %	0.74 %	2.33	2.20
Ibagué Col. Champagnat Escalado	1	1.45 %	1.37 %	0.40 %	0.58 %	3.62	2.36
	2	1.70 %	1.63 %	0.90 %	0.90 %	1.89	1.81
	3	1.67 %	1.59 %	0.74 %	0.74 %	2.25	2.15
Ecuador	1	1.21 %	1.15 %	0.40 %	0.58 %	3.03	1.98
	2	1.43 %	1.35 %	0.90 %	0.90 %	1.58	1.50
	3	1.40 %	1.39 %	0.74 %	0.74 %	1.89	1.88
Bolu	1	1.11 %	1.05 %	0.40 %	0.58 %	2.78	1.82
	2	1.31 %	1.24 %	0.90 %	0.90 %	1.45	1.38
	3	1.28 %	1.27 %	0.74 %	0.74 %	1.73	1.72

Fuente: el Autor

En la figura 5-5, se muestran las derivas del modelo estructural de las oficinas y locales comerciales de 3 pisos por cada sismo ensayado en la mesa sísmica y las derivas del edificio de diseño. Si se presentaran los sismos de Ibagué Col. Carlos Lleras, Estación de Bomberos, Cam la Pola, Gobernación y Col. Champagnat tanto en dirección X como en dirección Y los desplazamientos excederían los parámetros de diseño que podrían llegar a ocasionar daños en elementos estructurales, ajustando una deriva del 1% a nivel de piso no se observa desplazamientos que sobrepasen las condiciones sin embargo en pisos

superiores se sigue presentando desplazamientos que sobrepasan las limitaciones de diseño. Con los sismos de Ibagué escalados se observa que estos sobrepasan los límites que se tuvieron presentes para el diseño. Con el sismo de Armenia 1999 y el máximo esperado, de ocurrir se observaría una excedencia en las condiciones límites de diseño, al igual que con el sismo del Ecuador 2016 y Bolu 1999.

Figura 5–5: Derivas del modelo estructural de las oficinas y locales de 3 pisos por cada sismo y derivas de diseño del edificio de diseño



Fuente: el Autor

La tabla 5-10, muestra la relación entre las derivas obtenidas para el modelo estructural residencial de cinco pisos en la mesa sísmica con cada sismo en términos absolutos respecto a las derivas de diseño cumpliendo norma NSR 10 del edificio de diseño.

Tabla 5–10: Relación de derivas entre el modelo estructural de la Residencia Bifamiliar de cinco pisos y el edificio de diseño

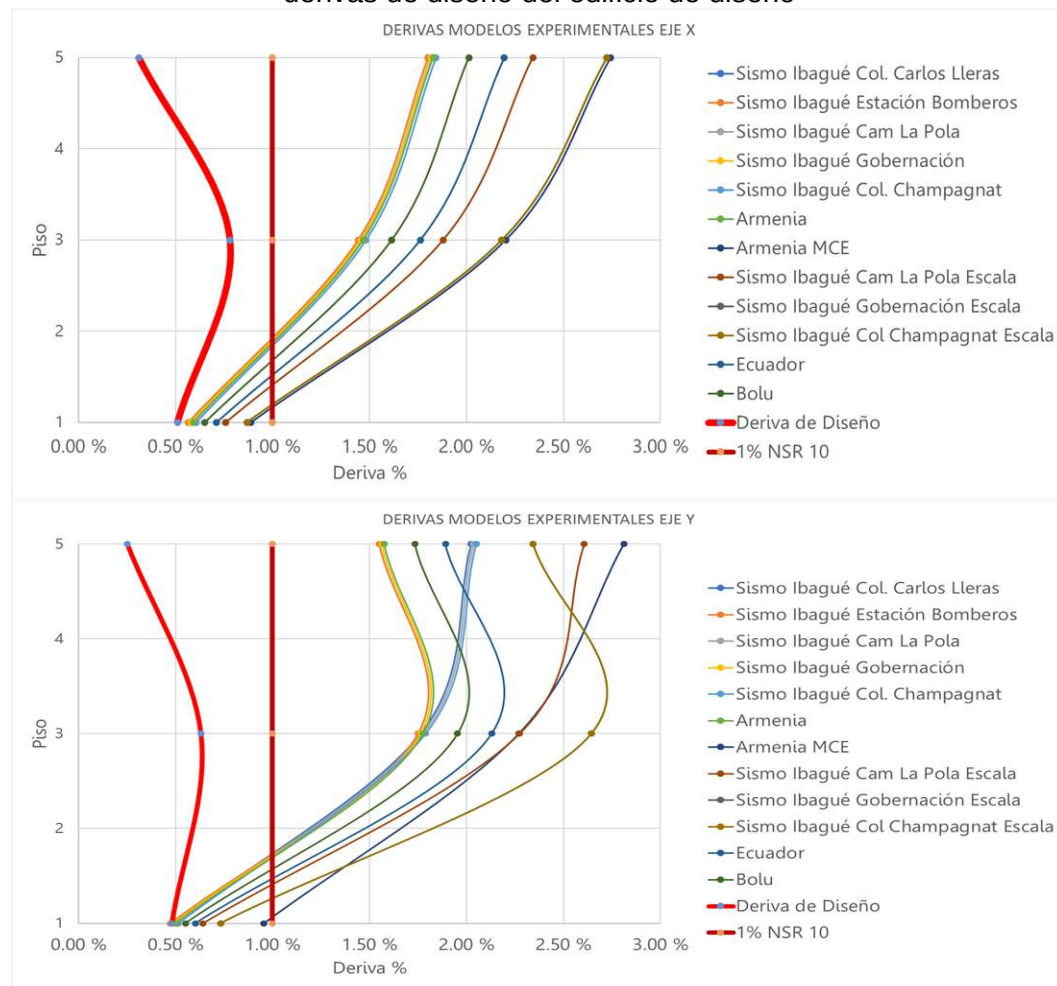
MODELO ESTRUCTURAL RESIDENCIAL DE 5 PISOS - DERIVA							
SISMO	PISO	Modelo Estructural		Edificio de Diseño		Relación Deriva	
		Deriva Eje X	Deriva Eje Y	Deriva Eje X	Deriva Eje Y	EJE X	EJE Y
Ibagué Col. Carlos Lleras	1	0.58 %	0.49 %	0.51 %	0.48 %	1.13	1.02
	3	1.45 %	1.76 %	0.78 %	0.63 %	1.86	2.80
	5	1.82 %	2.02 %	0.31 %	0.25 %	5.86	8.09
Ibagué Estación de Bomberos	1	0.57 %	0.47 %	0.40 %	0.58 %	1.41	0.82
	3	1.44 %	1.75 %	0.90 %	0.90 %	1.60	1.94
	5	1.80 %	1.55 %	0.74 %	0.74 %	2.44	2.09
Ibagué Cam La Pola	1	0.59 %	0.50 %	0.40 %	0.58 %	1.48	0.86
	3	1.47 %	1.78 %	0.90 %	0.90 %	1.63	1.97
	5	1.83 %	2.04 %	0.74 %	0.74 %	2.47	2.75
Ibagué Gobernación	1	0.58 %	0.49 %	0.40 %	0.58 %	1.45	0.84
	3	1.45 %	1.76 %	0.90 %	0.90 %	1.62	1.96
	5	1.82 %	1.56 %	0.74 %	0.74 %	2.45	2.11
Ibagué Col. Champagnat	1	0.61 %	0.51 %	0.40 %	0.58 %	1.51	0.89
	3	1.48 %	1.79 %	0.90 %	0.90 %	1.65	1.99
	5	1.84 %	2.05 %	0.74 %	0.74 %	2.49	2.77
Armenia	1	0.59 %	0.50 %	0.40 %	0.58 %	1.48	0.86
	3	1.47 %	1.78 %	0.90 %	0.90 %	1.63	1.97
	5	1.83 %	1.58 %	0.74 %	0.74 %	2.47	2.13
Armenia MCE	1	0.89 %	0.96 %	0.40 %	0.58 %	2.22	1.65
	3	2.20 %	2.27 %	0.90 %	0.90 %	2.45	2.52
	5	2.74 %	2.81 %	0.74 %	0.74 %	3.71	3.80
Ibagué Cam La Pola Escalado	1	0.76 %	0.64 %	0.40 %	0.58 %	1.89	1.11
	3	1.88 %	2.27 %	0.90 %	0.90 %	2.09	2.53
	5	2.34 %	2.61 %	0.74 %	0.74 %	3.16	3.52
Ibagué Gobernación Escalado	1	0.87 %	0.73 %	0.40 %	0.58 %	2.17	1.26
	3	2.18 %	2.64 %	0.90 %	0.90 %	2.42	2.94
	5	2.72 %	2.34 %	0.74 %	0.74 %	3.68	3.17
Ibagué Col. Champagnat Escalado	1	0.87 %	0.74 %	0.40 %	0.58 %	2.17	1.27
	3	2.12 %	2.56 %	0.90 %	0.90 %	2.35	2.84
	5	2.64 %	2.93 %	0.74 %	0.74 %	3.56	3.96
Ecuador	1	0.71 %	0.60 %	0.40 %	0.58 %	1.78	1.04
	3	1.76 %	2.13 %	0.90 %	0.90 %	1.96	2.37
	5	2.20 %	1.89 %	0.74 %	0.74 %	2.97	2.56

Bolu	1	0.65 %	0.55 %	0.40 %	0.58 %	1.63	0.95
	3	1.61 %	1.95 %	0.90 %	0.90 %	1.79	2.17
	5	2.01 %	1.73 %	0.74 %	0.74 %	2.72	2.34

Fuente: el Autor

En la figura 5-6, se muestran las derivas del modelo estructural residencial de 5 pisos por cada sismo ensayado en la mesa sísmica y las derivas del edificio de diseño. Si se presentaran los sismos de Ibagué Col. Carlos Lleras, Estación de Bomberos, Cam la Pola, Gobernación y Col. Champagnat tanto en dirección X como en dirección Y los desplazamientos excederían los parámetros de diseño que podrían llegar a ocasionar daños en elementos estructurales, ajustando una deriva del 1% a nivel de piso no se observa desplazamientos que sobrepasen las condiciones sin embargo en pisos superiores se sigue presentando desplazamientos que sobrepasan las limitaciones de diseño. Con los sismos de Ibagué escalados se observa que estos sobrepasan los límites que se tuvieron presentes para el diseño. Con el sismo de Armenia 1999 y el máximo esperado, de ocurrir se observaría una excedencia en las condiciones límites de diseño, al igual que con el sismo del Ecuador 2016 y Bolu 1999.

Figura 5–6: Derivas del modelo estructural residencial de 5 pisos por cada sismo y derivas de diseño del edificio de diseño



Fuente: el Autor

Considerando que caracterizamos el comportamiento de los edificios de diseño en modelos estructurales, también podemos considerar tener presente las aceleraciones producidas por los diferentes sismos de Ibagué, Armenia y la FEMA en los edificios. Con los resultados obtenidos se muestra la relación entre aceleración absoluta de piso frente a las de diseño requerida por la norma sismo resistente del 2010 para elementos no estructurales considerando el procedimiento de análisis y de diseño siguiendo los lineamientos definidos en el capítulo A.9 y el apéndice D-1 respectivamente. Para el modelo estructural de la institución educativa de 3 pisos se tiene que el grupo de uso es III (Atención a la Comunidad) y su grado de desempeño debe ser superior, para las oficinas y locales de 3 pisos su grupo de uso es II (Ocupación Especial) y su grado de desempeño

debe ser bueno y para el residencial de 5 pisos su grupo de uso es I (Ocupación Normal) y su grado de desempeño es bajo.

Tabla 5–11: Grado de Desempeño mínimo requerido NSR 10 Tabla A.9.2-1

Grupo de Uso	Grado de Desempeño
IV	Superior
III	Superior
III	Bueno
I	Bajo

Fuente: el Autor

Ecuaciones de aceleración de diseño en elementos no estructurales

$$ax = As + \left(\frac{(Sa - As) * hx}{heq} \right) \text{ si } hx \leq heq$$

$$ax = Sa * \frac{hx}{heq} \text{ donde; } heq = 0.75 * hn$$

$$ax = As = Aa * I$$

La tabla 5-12, muestra las aceleraciones de diseño por cada piso estimadas según el modelo matemático establecido en el capítulo A.9 de la NSR 10 para el modelo estructural de la institución educativa, las oficinas y el residencial.

Tabla 5–12: Aceleraciones de piso de acuerdo con la NSR 10 para cada modelo estructural

MODELO ESTRUCTURAL INS. EDUCATIVA			MODELO ESTRUCTURAL OFICINAS Y LOCALES			MODELO ESTRUCTURAL RESIDENCIAL		
PISO	hx (m)	ax (%g)	PISO	hx (m)	ax (%g)	PISO	hx (m)	ax (%g)
1	3.60	0.88	1	3.90	0.77	1	2.80	0.70
2	7.20	0.88	2	7.80	0.77	3	8.40	0.70
3	10.80	1.17	3	11.70	1.03	5	14.00	0.93

Fuente: el Autor

Con los datos obtenidos de los resultados del ensayo en la mesa sísmica con cada modelo estructural, se sacaron las aceleraciones reales esperadas en las edificaciones con los

diferentes sismos de Ibagué, Armenia, Ecuador y Bolu. Ahora bien, a continuación, se presentan las tablas y graficas comparativas de cada aceleración producida por cada sismo.

La tabla 5-13, muestra las aceleraciones de piso con cada sismo para el modelo estructural de la institución educativa frente a su relación con las aceleraciones de piso estimadas en el edificio de diseño con la NSR 10 para los elementos no estructurales.

Tabla 5–13: Relación de aceleraciones del modelo estructural de la institución educativa de 3 pisos y el edificio de diseño con NSR 10

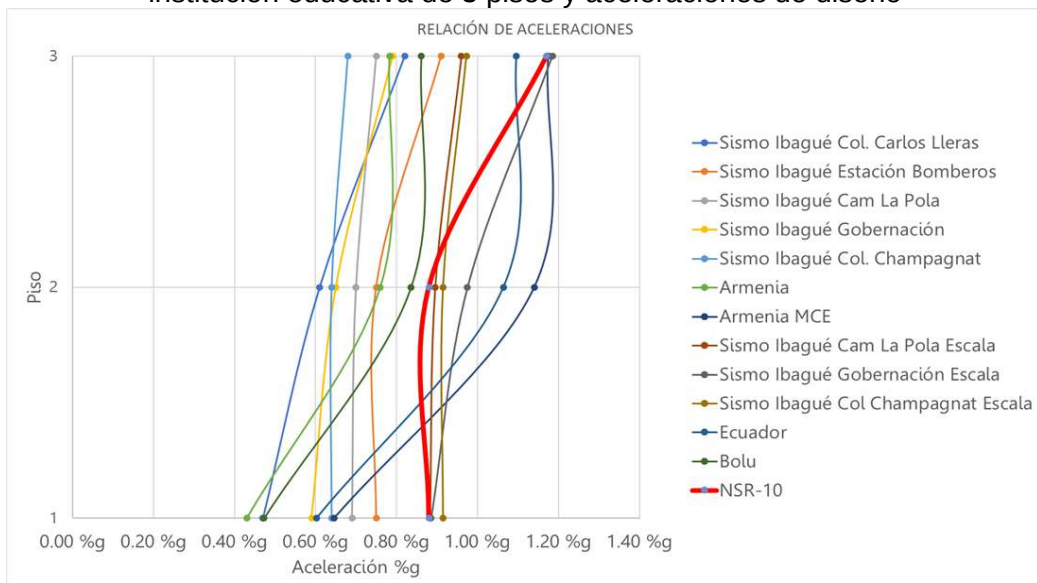
Modelo Estructural Institución Educativa de 3 Pisos - Aceleraciones en los Elementos No Estructurales							
SISMO	PISO	Modelo Estructural		Edificio de Diseño		Relación de Aceleración	
		Aceleración Máxima Abs Eje X	Aceleración Máxima Abs Eje Y	Aceleración de Diseño NSR 10 Eje X	Aceleración de Diseño NSR 10 Eje Y	EJE X	EJE Y
Ibagué Col. Carlos Lleras	1	0.47 %g	0.47 %g	0.88 %	0.88 %	0.53	0.53
	2	0.61 %g	0.61 %g	0.88 %	0.88 %	0.69	0.69
	3	0.82 %g	0.82 %g	1.17 %	1.17 %	0.70	0.70
Ibagué Estación de Bomberos	1	0.75 %g	0.75 %g	0.88 %	0.88 %	0.85	0.85
	2	0.75 %g	0.75 %g	0.88 %	0.88 %	0.85	0.85
	3	0.91 %g	0.91 %g	1.17 %	1.17 %	0.78	0.78
Ibagué Cam La Pola	1	0.69 %g	0.69 %g	0.88 %	0.88 %	0.78	0.78
	2	0.70 %g	0.70 %g	0.88 %	0.88 %	0.80	0.80
	3	0.75 %g	0.75 %g	1.17 %	1.17 %	0.64	0.64
Ibagué Gobernación	1	0.59 %g	0.59 %g	0.88 %	0.88 %	0.67	0.67
	2	0.65 %g	0.65 %g	0.88 %	0.88 %	0.74	0.74
	3	0.79 %g	0.79 %g	1.17 %	1.17 %	0.68	0.68
Ibagué Col. Champagnat	1	0.64 %g	0.64 %g	0.88 %	0.88 %	0.73	0.73
	2	0.64 %g	0.64 %g	0.88 %	0.88 %	0.73	0.73
	3	0.68 %g	0.68 %g	1.17 %	1.17 %	0.58	0.58
Armenia	1	0.43 %g	0.43 %g	0.88 %	0.88 %	0.49	0.49
	2	0.76 %g	0.76 %g	0.88 %	0.88 %	0.86	0.86
	3	0.78 %g	0.78 %g	1.17 %	1.17 %	0.67	0.67
Armenia MCE	1	0.65 %g	0.65 %g	0.88 %	0.88 %	0.73	0.73
	2	1.14 %g	1.14 %g	0.88 %	0.88 %	1.30	1.30
	3	1.17 %g	1.17 %g	1.17 %	1.17 %	1.00	1.00
Ibagué Cam La Pola Escalado	1	0.88 %g	0.88 %g	0.88 %	0.88 %	1.00	1.00
	2	0.90 %g	0.90 %g	0.88 %	0.88 %	1.02	1.02
	3	0.96 %g	0.96 %g	1.17 %	1.17 %	0.82	0.82
	1	0.89 %g	0.89 %g	0.88 %	0.88 %	1.01	1.01

Ibagué Gobernación Escalado	2	0.98 %g	0.98 %g	0.88 %	0.88 %	1.11	1.11
	3	1.19 %g	1.19 %g	1.17 %	1.17 %	1.01	1.01
Ibagué Col. Champagnat Escalado	1	0.92 %g	0.92 %g	0.88 %	0.88 %	1.04	1.04
	2	0.92 %g	0.92 %g	0.88 %	0.88 %	1.04	1.04
	3	0.97 %g	0.97 %g	1.17 %	1.17 %	0.83	0.83
Ecuador	1	0.60 %g	0.60 %g	0.88 %	0.88 %	0.68	0.68
	2	1.06 %g	1.06 %g	0.88 %	0.88 %	1.21	1.21
	3	1.10 %g	1.10 %g	1.17 %	1.17 %	0.94	0.94
Bolu	1	0.47 %g	0.47 %g	0.88 %	0.88 %	0.54	0.54
	2	0.84 %g	0.84 %g	0.88 %	0.88 %	0.95	0.95
	3	0.86 %g	0.86 %g	1.17 %	1.17 %	0.74	0.74

Fuente: el Autor

La figura 5-7, muestra la gráfica comparativa de cada aceleración producida por los sismos de Ibagué, Armenia y la FEMA para el modelo estructural de la institución educativa de 3 pisos y su relación con las aceleraciones de diseño por piso del edificio de diseño. Se puede observar que con los sismos escalados de Ibagué, armenia máximo esperado y Ecuador se presentarían aceleraciones que sobrepasan las estimadas para diseño por lo cual podría llegar a generar afectaciones en la integridad de los elementos no estructurales, otro aspecto que se puede observar es que ninguno de los sismos de Ibagué, Armenia y Bolu presentan aceleraciones que excedan el límite estimado por diseño considerado por norma, se puede decir que a futuro el comportamiento de los elementos no estructurales para esta amenaza están bien considerados.

Figura 5–7: Aceleraciones de piso por cada sismo para el modelo estructural de la institución educativa de 3 pisos y aceleraciones de diseño



Fuente: el Autor

La tabla 5-14 muestra las aceleraciones de piso con cada sismo para el modelo estructural de las oficinas y locales comerciales frente a su relación con las aceleraciones de piso estimadas en el edificio de diseño con la NSR 10 para los elementos no estructurales.

Tabla 5–14: Relación de aceleraciones del modelo estructural de las oficinas y locales comerciales de 3 pisos y el edificio de diseño con NSR 10

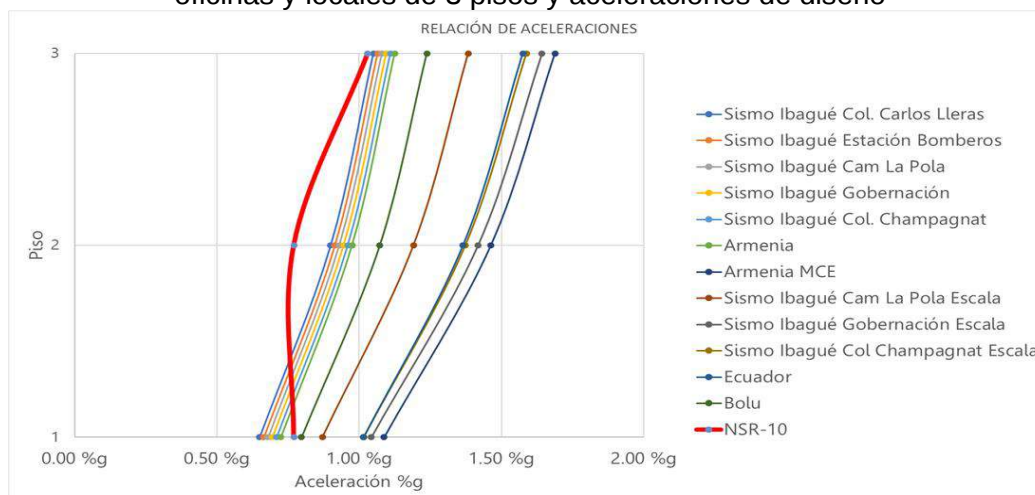
Modelo Estructural Oficinas y Locales de 3 pisos - Aceleraciones en los Elementos No Estructurales							
SISMO	PISO	Modelo del Edificio		Edificio Diseñado - Construido		Relación Aceleración en Edificio con Aceleración en el Modelo	
		Aceleración Máxima Abs Eje X	Aceleración máxima Abs Eje Y	Aceleración de Diseño NSR 10 Eje X	Aceleración de Diseño NSR 10 Eje Y	EJE X	EJE Y
Ibagué Col. Carlos Lleras	1	0.65 %g	0.65 %g	0.77 %	0.77 %	0.84	0.84
	2	0.90 %g	0.90 %g	0.77 %	0.77 %	1.17	1.17
	3	1.05 %g	1.05 %g	1.03 %	1.03 %	1.02	1.02
Ibagué Estación de Bomberos	1	0.67 %g	0.67 %g	0.77 %	0.77 %	0.86	0.86
	2	0.92 %g	0.92 %g	0.77 %	0.77 %	1.19	1.19
	3	1.07 %g	1.07 %g	1.03 %	1.03 %	1.03	1.03
Ibagué Cam La Pola	1	0.68 %g	0.68 %g	0.77 %	0.77 %	0.88	0.88
	2	0.93 %g	0.93 %g	0.77 %	0.77 %	1.21	1.21
	3	1.08 %g	1.08 %g	1.03 %	1.03 %	1.05	1.05
Ibagué Gobernación	1	0.70 %g	0.70 %g	0.77 %	0.77 %	0.90	0.90
	2	0.95 %g	0.95 %g	0.77 %	0.77 %	1.23	1.23
	3	1.10 %g	1.10 %g	1.03 %	1.03 %	1.06	1.06
Ibagué Col. Champagnat	1	0.71 %g	0.71 %g	0.77 %	0.77 %	0.92	0.92
	2	0.96 %g	0.96 %g	0.77 %	0.77 %	1.25	1.25
	3	1.11 %g	1.11 %g	1.03 %	1.03 %	1.08	1.08
Armenia	1	0.73 %g	0.73 %g	0.77 %	0.77 %	0.94	0.94
	2	0.98 %g	0.98 %g	0.77 %	0.77 %	1.27	1.27
	3	1.13 %g	1.13 %g	1.03 %	1.03 %	1.09	1.09
Armenia MCE	1	1.09 %g	1.09 %g	0.77 %	0.77 %	1.41	1.41
	2	1.46 %g	1.46 %g	0.77 %	0.77 %	1.90	1.90
	3	1.69 %g	1.69 %g	1.03 %	1.03 %	1.64	1.64
Ibagué Cam La Pola Escalado	1	0.87 %g	0.87 %g	0.77 %	0.77 %	1.13	1.13
	2	1.19 %g	1.19 %g	0.77 %	0.77 %	1.55	1.55
	3	1.38 %g	1.38 %g	1.03 %	1.03 %	1.34	1.34

Ibagué Gobernación Escalado	1	1.04 %g	1.04 %g	0.77 %	0.77 %	1.35	1.35
	2	1.42 %g	1.42 %g	0.77 %	0.77 %	1.84	1.84
	3	1.64 %g	1.64 %g	1.03 %	1.03 %	1.59	1.59
Ibagué Col. Champagnat Escalado	1	1.02 %g	1.02 %g	0.77 %	0.77 %	1.32	1.32
	2	1.37 %g	1.37 %g	0.77 %	0.77 %	1.78	1.78
	3	1.59 %g	1.59 %g	1.03 %	1.03 %	1.54	1.54
Ecuador	1	1.02 %g	1.02 %g	0.77 %	0.77 %	1.32	1.32
	2	1.37 %g	1.37 %g	0.77 %	0.77 %	1.77	1.77
	3	1.58 %g	1.58 %g	1.03 %	1.03 %	1.53	1.53
Bolu	1	0.80 %g	0.80 %g	0.77 %	0.77 %	1.04	1.04
	2	1.07 %g	1.07 %g	0.77 %	0.77 %	1.39	1.39
	3	1.24 %g	1.24 %g	1.03 %	1.03 %	1.20	1.20

Fuente: el Autor

La figura 5-8, muestra la gráfica comparativa de cada aceleración producida por los sismos de Ibagué, Armenia y la FEMA para el modelo estructural de las oficinas y locales comerciales de 3 pisos y su relación con las aceleraciones de diseño por piso del edificio de diseño. Se puede observar en la gráfica que de ocurrir a futuro sismos de Ibagué y los de Ibagué escalados estos generarían aceleraciones que excederían las consideradas por el reglamento para el diseño lo que puede alterar la funcionalidad y estabilidad de los elementos no estructurales en pisos superiores a la base. Con casos como los sismos de Armenia, Ecuador y Bolu, el límite de diseño presenta excedencia en sus consideraciones las cuales a futuro puede ocasionar daños que afecten la seguridad de sus ocupantes, así como pérdidas económicas.

Figura 5–8: Aceleraciones de piso por cada sismo para el modelo estructural de las oficinas y locales de 3 pisos y aceleraciones de diseño



Fuente: el Autor

La tabla 5-15, muestra las aceleraciones de piso con cada sismo para el modelo estructural residencial frente a su relación con las aceleraciones de piso estimadas en el edificio de diseño con la NSR 10 para los elementos no estructurales.

Tabla 5–15: Relación de aceleraciones del modelo estructural residencial de 5 pisos y el edificio de diseño con NSR 10

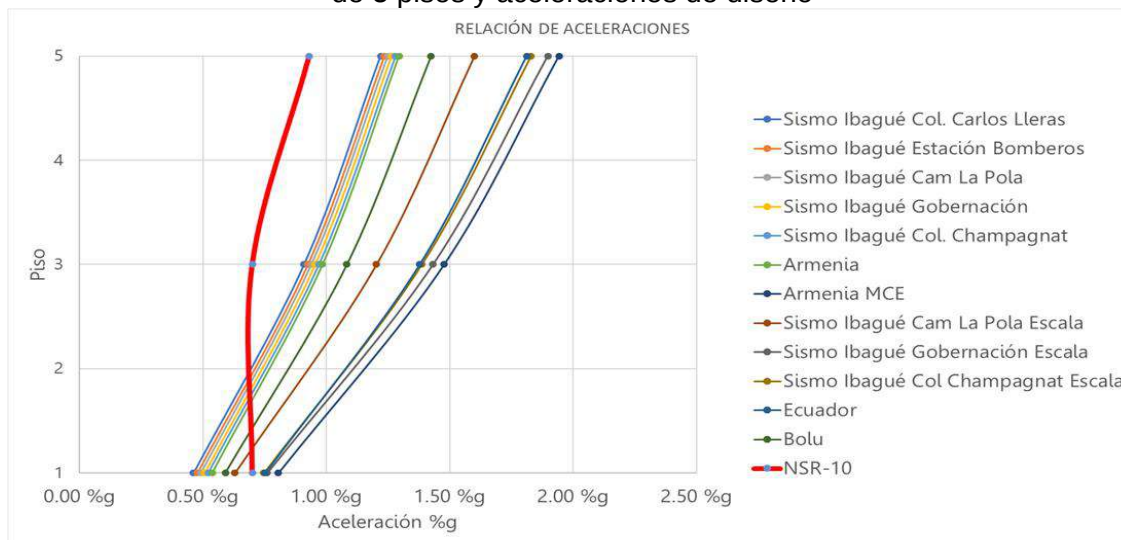
Modelo Estructural residencial de 5 pisos - Aceleraciones en los Elementos No Estructurales							
SISMO	PISO	Modelo del Edificio		Edificio Diseñado - Construido		Relación Aceleración en Edificio con Aceleración en el Modelo	
		Aceleración máxima Abs Eje X	Aceleración máxima Abs Eje Y	Aceleración de Diseño NSR 10 Eje X	Aceleración de Diseño NSR 10 Eje Y	EJE X	EJE Y
Ibagué Col. Carlos Lleras	1	0.46 %g	0.46 %g	0.70 %	0.70 %	0.66	0.66
	3	0.91 %g	0.91 %g	0.70 %	0.70 %	1.30	1.30
	5	1.22 %g	1.22 %g	0.93 %	0.93 %	1.31	1.31
Ibagué Estación de Bomberos	1	0.48 %g	0.48 %g	0.70 %	0.70 %	0.68	0.68
	3	0.93 %g	0.93 %g	0.70 %	0.70 %	1.32	1.32
	5	1.24 %g	1.24 %g	0.93 %	0.93 %	1.33	1.33
Ibagué Cam La Pola	1	0.49 %g	0.49 %g	0.70 %	0.70 %	0.70	0.70
	3	0.94 %g	0.94 %g	0.70 %	0.70 %	1.34	1.34
	5	1.25 %g	1.25 %g	0.93 %	0.93 %	1.34	1.34
Ibagué Gobernación	1	0.51 %g	0.51 %g	0.70 %	0.70 %	0.72	0.72
	3	0.96 %g	0.96 %g	0.70 %	0.70 %	1.36	1.36
	5	1.27 %g	1.27 %g	0.93 %	0.93 %	1.36	1.36
Ibagué Col. Champagnat	1	0.52 %g	0.52 %g	0.70 %	0.70 %	0.75	0.75
	3	0.97 %g	0.97 %g	0.70 %	0.70 %	1.39	1.39
	5	1.28 %g	1.28 %g	0.93 %	0.93 %	1.38	1.38
Armenia	1	0.54 %g	0.54 %g	0.70 %	0.70 %	0.77	0.77
	3	0.99 %g	0.99 %g	0.70 %	0.70 %	1.41	1.41
	5	1.30 %g	1.30 %g	0.93 %	0.93 %	1.39	1.39
Armenia MCE	1	0.81 %g	0.81 %g	0.70 %	0.70 %	1.15	1.15
	3	1.48 %g	1.48 %g	0.70 %	0.70 %	2.11	2.11
	5	1.94 %g	1.94 %g	0.93 %	0.93 %	2.09	2.09
Ibagué Cam La Pola Escalado	1	0.63 %g	0.63 %g	0.70 %	0.70 %	0.90	0.90
	3	1.20 %g	1.20 %g	0.70 %	0.70 %	1.72	1.72
	5	1.60 %g	1.60 %g	0.93 %	0.93 %	1.72	1.72
Ibagué Gobernación Escalado	1	0.76 %g	0.76 %g	0.70 %	0.70 %	1.09	1.09
	3	1.43 %g	1.43 %g	0.70 %	0.70 %	2.05	2.05
	5	1.90 %g	1.90 %g	0.93 %	0.93 %	2.04	2.04

Ibagué Col. Champagnat Escalado	1	0.75 %g	0.75 %g	0.70 %	0.70 %	1.07	1.07
	3	1.39 %g	1.39 %g	0.70 %	0.70 %	1.98	1.98
	5	1.83 %g	1.83 %g	0.93 %	0.93 %	1.97	1.97
Ecuador	1	0.75 %g	0.75 %g	0.70 %	0.70 %	1.07	1.07
	3	1.38 %g	1.38 %g	0.70 %	0.70 %	1.97	1.97
	5	1.81 %g	1.81 %g	0.93 %	0.93 %	1.95	1.95
Bolu	1	0.59 %g	0.59 %g	0.70 %	0.70 %	0.84	0.84
	3	1.08 %g	1.08 %g	0.70 %	0.70 %	1.55	1.55
	5	1.42 %g	1.42 %g	0.93 %	0.93 %	1.53	1.53

Fuente: el Autor

La figura 5-9, muestra la gráfica comparativa de cada aceleración producida por los sismos de Ibagué, Armenia y la FEMA para el modelo estructural residencial de 5 pisos y su relación con las aceleraciones de diseño por piso del edificio de diseño. Se puede observar así como en el modelo de oficinas que de ocurrir a futuro sismos de Ibagué y los de Ibagué escalados estos generarían aceleraciones que excederían las consideradas por el reglamento para el diseño lo que puede alterar la funcionalidad y estabilidad de los elementos no estructurales en pisos superiores a la base. Con casos como los sismos de Armenia, Ecuador y Bolu, el límite de diseño presenta excedencia en sus consideraciones las cuales a futuro puede ocasionar daños que afecten la seguridad de sus ocupantes, así como pérdidas económicas.

Figura 5-9: Aceleraciones de piso por cada sismo para el modelo estructural residencial de 5 pisos y aceleraciones de diseño



Fuente: el Autor

6. Conclusiones

- Frente a la amenaza sísmica de Colombia que se presenta, se deben incorporar a las normas de diseño y construcción los estudios de riesgo sísmico y del comportamiento de modelos estructurales con un riesgo sísmico real, los cuales son desarrollados en el país por las diferentes universidades, para generar un aumento en la confiabilidad del diseño estructural sismo resistente y así obtener mayor información del comportamiento dinámico de las estructuras, con la finalidad de generar nuevas metodologías de diseño estructural frente a la sismicidad de cada región, tipo de suelo, lo cual podría reducir la incertidumbre al momento de un evento sísmico futuro.
- La amenaza sísmica de Ibagué considera un riesgo bastante alto debido a sus fallas y cercanía con fuentes sísmicas activas, como se evidencia al momento de identificar y obtener los registros sísmicos, los cuales son inexistentes a niveles prácticos, lo que permite concluir que el monitoreo de la ciudad de Ibagué es insuficiente, por tanto deben generarse estudios que permitan tener un conocimiento de los procedimientos y metodologías de diseño en relación al riesgo sísmico probable sobre las edificaciones a futuro que tiene la ciudad de Ibagué para evitar excedencia en los límites normativos de diseño. Es importante decir que para la obtención de los registros sísmicos se tuvo que recurrir al estudio de microzonificación sísmica para generar una amenaza simulada, según los escenarios propuestos de acuerdo a espectros de aceleración que consideran patrones del comportamiento dinámico del suelo, pero, no se sabe cuál es la fuente sismogénica, por lo que se resalta la importancia de tener un control mediante monitoreo de la ciudad para reducir la incertidumbre frente al riesgo sísmico que puede representar un problema de corto a mediano plazo para la infraestructura de la ciudad de Ibagué.

- Considerar fuentes cercanas de actividad sísmica como lo es Armenia – Quindío, permite tener en conocimiento un posible escenario, con base en este, generar acciones que permitan entender y de esta forma reducir el riesgo sísmico frente a una excedencia de los límites de diseño normativos en las estructuras de la ciudad de Ibagué, por lo anterior, se puede establecer que considerar casos como el sismo de Ecuador, el cual es una fuente que se puede considerar cercana al país, permite entender el comportamiento que puede tener una estructura frente a una amenaza de estas características o similares, de igual forma, también puede ser el caso de considerar un sismo lejano como es el de Bolu Turquía, estos casos permiten llevar escenarios probables y tener un mejor control de las estructuras y su comportamiento.
- Tener presente una amenaza sísmica, la cual puede generar escenarios donde se afecte la estabilidad de las estructuras, representadas en medios simulados con ayuda de una mesa sísmica permite caracterizar y entender cómo se puede comportar un sistema estructural propuesto, para dar solución a una necesidad humana, mediante la transformación de materiales a espacios estructurales de uso específico, de modo que, poder representar estructuras reales de construcción en modelo estructurales de tamaño reducido que caracterizan el comportamiento, genera grandes ventajas para comprender el riesgo sísmico que puede tener el edificio frente a una amenaza sísmica real, y de esta manera generar un control o intervención física de algún edificio, con el fin de mejorar las condiciones de salud estructural.
- De acuerdo con los resultados de la caracterización de los modelos estructurales ensayados en la mesa sísmica, con los sismos de Ibagué y demás, caracterizan en buena medida el comportamiento dinámico de la estructura de los edificios de diseño y construcción, de acuerdo con su rigidez global relacionada a la masa que produce aceleraciones en la misma proporción con un margen de relación global entre el 1% al 17%.
- La importancia de generar entornos controlados donde se puede conocer el comportamiento de una estructura frente a una amenaza sísmica de carácter real, en la cual se puede evidenciar el riesgo sísmico frente a las excedencias de las limitantes de diseño propuestas en las normativas y la afectación de la estabilidad respecto a su tipo de uso, nos permite afirmar, que al caracterizar los edificios de

diseño y construcción con configuraciones arquitectónicas y estructurales probables, como lo son las encontradas en la ciudad de Ibagué, en modelos estructurales que los caracterizan, permite tener control de la respuesta física de algún edificio, donde muchos de ellos ya tienen tiempo de haberse construido.

Con respecto a la caracterización de la institución educativa de tres pisos ubicada en la ciudad de Ibagué, podemos decir a partir del estudio en mesa sísmica sobre su respectivo modelo estructural lo siguiente:

- Los factores de normalización, mediante la igualación de aceleraciones implementando la cortante en la base, realizado con el modelo matemático planteado por aceleraciones recibidas, permite decir que el margen de relación oscilo entre el 1% al 15%, por consiguiente, podemos afirmar que la aceleración recibida por el modelo estructural en la mesa sísmica, la cual representa cada uno de los sismos ocurridos en la ciudad de Ibagué, corresponde a la recibida, en términos de aceleración, por el edificio de diseño.
- Respecto a los resultados de cortante que se obtuvieron con los sismos de Ibagué correspondientes a: Col. Carlos Lleras, Estación de Bomberos, Cam la Pola, Gobernación y Col. Champagnat, no producen una aceleración que sobrepase la capacidad de diseño considerada en el edificio; Sin embargo, en caso de recibir sismos de Ibagué escalados a futuro sí se puede llegar a presentar excedencia en la limitaciones de diseño con Cam la Pola Escalado, Gobernación Escalado y Col. Champagnat Escalado, lo que puede afectar la integridad de los elementos estructurales; de igual forma, podemos establecer que de tener el sismo de Armenia de 1999 y el máximo esperado, se presentaría excedencia en la cortante de diseño por piso al igual que con el sismo de Ecuador 2016 y Bolu 1999.
- Considerando la probabilidad de tener sismos de Ibagué Estación de Bomberos, Cam la Pola, Gobernación y Col. Champagnat tanto en dirección X como en dirección Y presentan desplazamientos que exceden los parámetros de diseño del edificio, los cuales pueden generar a futuro daños en elementos de resistencia sísmica que afecten las condiciones de servicio, con el sismo Col. Carlos Lleras en el sentido del eje Y, en su piso intermedio se observa que no excede las derivas de diseño sin embargo en pisos superiores si se presentan grandes desplazamientos por lo tanto se debe prestar atención a la configuración considerada en la

estructura. Si se llegaran a presentar sismos de Ibagué escalados estos presentarían en el edificio desplazamientos que excede las condiciones límites de diseño colocadas por tanto es importante revisar que posibles daños se presentarían a nivel estructural. Para condiciones del sismo de Armenia 1999 y el máximo esperado se evidencia excedencia en el límite de diseño lo que a futuro puede comprometer la estabilidad del edificio, y con sismos como el del Ecuador 2016 y Bolu 1999, probablemente evidenciaran desplazamientos que generen daños a nivel estructural que comprometa la estabilidad y seguridad del edificio y sus ocupantes. Por último de presentar ajustes que lleven las derivas de diseño a un 1%, podríamos decir que de ocurrir sismos como Col. Carlos Lleras y Col. Champagnat las limitaciones de diseño no serían excedidas.

- Para los elementos no estructurales las aceleraciones horizontales son un parámetro fundamental en el cual podemos decir que de tener aceleraciones con sismos escalados de Ibagué, Armenia máximo esperado y Ecuador estos presentarían aceleraciones que sobrepasan las limitaciones estimadas para diseño por lo cual podría llegar a generar afectaciones en la integridad de los elementos no estructurales así como en sus fijaciones en el exterior e interior del edificio, otro aspecto que se pudo observar es que ninguno de los sismos de Ibagué, Armenia y Bolu presentan aceleraciones que excedan el límite estimado por diseño considerado por norma por tanto de considerar una amenaza sísmica a futuro, el comportamiento de los elementos no estructurales están bien considerados.

Para la caracterización el edificio de las oficinas y locales comerciales de 3 pisos ubicado en la ciudad de Ibagué podemos decir a partir de su modelo estructural probado en mesa sísmica, lo siguiente:

- Los factores de normalización, mediante la igualación de aceleraciones implementando la cortante en la base, realizado con el modelo matemático planteado por aceleraciones recibidas, permite decir que el margen de relación oscilo entre el 1% al 17%, por consiguiente, podemos afirmar que la aceleración recibida por el modelo estructural en la mesa sísmica, la cual representa cada uno de los sismos ocurridos en la ciudad de Ibagué, corresponde a la recibida, en términos de aceleración, por el edificio de diseño.

- Respecto a los resultados de cortante que se obtuvieron con los sismos de Ibagué Estación de Bomberos, Cam la Pola, Gobernación y Col. Champagnat estos no producen una aceleración que sobrepase la capacidad por cortante de diseño; con el sismo de Ibagué Col. Carlos Lleras en dirección del Eje Y, se observó que sobrepasa el límite establecido para diseño, por lo cual es importante revisar la formulación del diseño estructural para que a futuro el edificio no presente problemas que afecten su integridad; de igual forma se presentarían problemas de tener a futuro sismos como Cam la Pola Escalado, Gobernación Escalado y Col. Champagnat Escalado. Por último, si se considera la probabilidad de tener el sismo de Armenia 1999, Ecuador 2016 y Bolu 1999, la estructura a futuro podría llegar a presentar excedencias que alteren la integridad estructural.
- Considerando la probabilidad de tener sismos Col. Carlos Lleras, Estación de Bomberos, Cam la Pola, Gobernación y Col. Champagnat tanto en dirección X como en dirección Y, los desplazamientos excederían los parámetros de diseño que podrían llegar a ocasionar daños en elementos estructurales, ajustando un diseño para una deriva del 1% a nivel de piso no se observa desplazamientos que sobrepasen las condiciones sin embargo en pisos superiores se sigue presentando desplazamientos que sobrepasan las limitaciones de diseño. Con los sismos de Ibagué escalados se observa que estos sobrepasan los límites que se tuvieron presentes para el diseño y por último con el sismo de Armenia 1999 y el máximo esperado, de ocurrir se observaría una excedencia en las condiciones límites de desplazamiento, al igual que con el sismo del Ecuador 2016 y Bolu 1999.
- Comparando cada aceleración producida por sismos de Ibagué y los escalados, se concluye que las aceleraciones excesivas pueden alterar la funcionalidad y estabilidad de los elementos no estructurales los cuales pueden afectar la seguridad de sus ocupantes así como pérdidas económicas; sin embargo se observó en los resultados que en los pisos bajos no se presenta una aceleración que sobrepase las estimadas para el diseño.

De acuerdo con la caracterización del edificio residencial de 5 pisos ubicado en la ciudad de Ibagué y el posterior análisis a su modelo estructural, podemos decir:

- Los factores de normalización, mediante la igualación de aceleraciones implementando la cortante en la base, realizado con el modelo matemático

planteado por aceleraciones recibidas, permite decir que el margen de relación oscila entre el 1% al 12%, por consiguiente, podemos afirmar que la aceleración recibida por el modelo estructural en la mesa sísmica, la cual representa cada uno de los sismos ocurridos en la ciudad de Ibagué, corresponde a la recibida, en términos de aceleración, por el edificio de diseño.

- Respecto a los resultados de cortante que se obtuvieron con los sismos de Ibagué Estación de Bomberos, Cam la Pola, Gobernación y Col. Champagnat estos no producen una aceleración que sobrepase la capacidad por cortante de diseño; con el sismo de Ibagué Col. Carlos Lleras en dirección del Eje Y, se observó que sobrepasa el límite establecido para diseño, por lo cual es importante revisar la formulación del diseño estructural para que a futuro el edificio no presente problemas que afecten su integridad; de igual forma se presentarían problemas de tener a futuro sismos como Cam la Pola Escalado, Gobernación Escalado y Col. Champagnat Escalado.
- Considerando la probabilidad de tener sismos Col. Carlos Lleras, Estación de Bomberos, Cam la Pola, Gobernación y Col. Champagnat tanto en dirección X como en dirección Y, los desplazamientos excederían los parámetros de diseño que podrían llegar a ocasionar daños en elementos estructurales, ajustando un diseño para una deriva del 1% a nivel de piso no se observa desplazamientos que sobrepasen las condiciones sin embargo en pisos superiores se sigue presentando desplazamientos que sobrepasan las limitaciones de diseño. Con los sismos de Ibagué escalados se observa que estos sobrepasan los límites que se tuvieron presentes para el diseño.
- Comparando cada aceleración producida por los sismos de Ibagué y los de Ibagué escalados, se concluye que, las aceleraciones excesivas pueden alterar la funcionalidad y estabilidad de los elementos no estructurales del piso 2 al piso 3, sin embargo, en el piso uno cumple con el límite estimado de diseño según NSR 10, De considerar los sismos de Armenia, Ecuador y Bolu, se evidencia que no cumplen con el límite de diseño del edificio lo que puede ocasionar daños en los elementos no estructurales, así como alterar su estabilidad.
- Podemos decir que para edificios de uso residencial es importante entender y comprender su comportamiento frente a la amenaza sísmica con la finalidad de establecer sistemas estructurales que puedan soportar cargas laterales y de esta

manera no afectar a sus ocupantes y causar pérdidas de vidas humanas y económicas, considerando que son el tipo de edificio con mas uso dentro de las ciudades Colombianas.

6.1 Recomendaciones

- Para una investigación futura, a la hora de la recolección de información se puede tener en cuenta el monitoreo de estructuras existentes, en donde se evalué las aceleraciones y desplazamientos en forma operativas las cuales pueden influir para encontrar una respuesta real y generar algún tipo de intervención que permita mejorar la salud del edificio.
- Para nuevas investigaciones es importante que se definan parámetros reales que permitan entender el comportamiento sísmico de la ciudad de Ibagué, en donde se tenga en cuenta la variabilidad de las condiciones en la infraestructura de las edificaciones, tal como, su configuración arquitectónica, además de tener en constante observación las fuentes sísmicas locales para determinar una amenaza real que permita entender de mejor manera el riesgo futuro.
- Tener en cuenta cuales son los modos de vibrar que más influyen en las características de las estructuras, para que se determine como pueden ser mejoradas esas condiciones o cuales serían las políticas públicas efectivas para los resultados que se obtengan después.
- El modelo estructural debe ajustarse con mayor precisión, para que al momento de llevar la experimentación se tenga el comportamiento caracterizado y esperado en el edificio que se pretenda ensayar mediante simulaciones en entornos controlados, como se evidencio con los resultados siempre se presenta un margen de error el cual no supero más de 17%, sin embargo, puede generar incertidumbre frente al comportamiento del edificio.

A. Anexo: Código para el cálculo de la señal de desplazamiento

```
% Autor: Pablo Arturo Jiménez Puentes
% Fecha: 9 - septiembre - 2022
clear all;
clc;
% Datos de entrada
filename = 'sismo.xlsx.'
As = xlsread(filename); % [g]
dt = 0.01.
n = length (As).
tmax = dt*n.
t = Lin space (0, tmax, n)'.
% Calculamos la velocidad en cm/s:
v_gs = (cumsum (As)*dt) - mean (cumsum (As)*dt); % [g/s]
v_cms = v_gs*1000; % [cm/s]
% Calculamos el desplazamiento en cm:
d_cm = (cumsum(v_cms) *dt) - mean(cumsum(v_cms) *dt); % [cm]
d_mm = d_cm * 10; % [mm]
d_mm_10 = d_mm * 10.
```

B. Anexo: Código para el cálculo de la señal de desplazamiento

```
% AUTOR:      Pablo Arturo Jiménez Puentes
% FECHA:      10 - septiembre - 2022
clc
% Datos de entrada
Dt = 0.005;    % delta de tiempo [s]
filename = 'señal.xlsx.'
As = xlsread (filename).
N = length (As).
y = detrend (As); %Corrección de dispersión de Datos
% Inicialización de las variables del modelo:
i=1.
Ts(i) = 0.
% Ts = zeros(N).
% Obtención:
for i=1:(N-1)
    Ts(i+1) = Ts(i) + Dt.
end
O = As/y;
A = max(O);
E = max(A); % Confiabilidad de los datos
```

C. Código de licencia ETABS (Versión de Prueba)

22/12/22, 10:50

Correo de Universidad Nacional de Colombia - CSI | ETABS Trial Download



Pablo Arturo Jimenez Puentes <pjimenezpu@unal.edu.co>

CSI | ETABS Trial Download

1 mensaje

Computers and Structures, Inc. <sales@csiamerica.com>

19 de diciembre de 2022, 10:35

Responder a: "Computers and Structures, Inc." <messages.4073735.38626647.df85a1eba2@4073735.email.netsuite.com>

Para: pjimenezpu@unal.edu.co



Dear Pablo Arturo Jimenez Puentes,

Thank you for requesting a trial version of ETABS.

Trial Conditions

- The trial version is for evaluation purposes only, and may not be used for commercial or professional purposes.
- Use of the trial version is limited to a single machine.
- Use of the trial version is limited to 30 days, after which time you must acquire a standard license from CSI to continue using the software, whether on the same or a different machine.

Instructions

- Download the installer from the link below.
- Run the downloaded installer on the machine you plan to use for evaluating ETABS.
- When you are ready to begin your trial, run ETABS from the shortcut on your desktop or from the Windows Start menu.
- When prompted for an activation key, enter the trial activation key shown below.
- ETABS will now run in Trial mode.
- You can select Continue each time you run ETABS until the end of the Trial period.

The 30-day trial begins the first time you run ETABS, whether you enter your activation key or not, so please wait until you have time to properly evaluate the software before starting ETABS.

Download Link: [ETABS Trial](#)

ETABS TRIAL REGISTRATION DETAILS

Trial Activation Key	TRIAL-A294CDC69828B517A3569B4F1C
Trial Duration	30 Days

For questions about ETABS or to obtain a standard license, please contact the [CSI Sales Department](#) or your local [CSI Channel Partner](#).

D. Resultados de los ensayos de los modelos estructurales

De requerir los datos de los ensayos de los modelos estructurales por favor solicitarlos al correo pjimenezpu@unal.edu.co.

E. Datos de los sismos sintéticos de Ibagué, Armenia, Ecuador y Bolu

De requerir los acelerogramas, señales de desplazamientos y espectros utilizados para los ensayos en la mesa sísmica con los modelos estructurales por favor solicitarlos al correo pjimenezpu@unal.edu.co.

Bibliografía

AIS, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente: NSR-10. Bogotá: Comisión asesora para el régimen de construcciones sismo resistentes, marzo de 2010. 2130 p

ASCE 7 (2022). Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and other structures. Technical report, ASCE/SEI 7-16. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.

Ayllon Lopez Diana (2017). Implementación de mesa vibratoria unidireccional para simulación sísmica y experimentación con modelos reducidos

César M, López R (2006). Dificultades en la evaluación de la amenaza sísmica de Ibagué debido a la escasez de datos

Clavijo Juan & Ramírez Luis, 2011. DISEÑO, MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE UNA MESA SISMICA UNIDIRECCIONAL HIDRAULICA. Universidad Industrial de Santander.

Microzonificación sísmica de Ibagué (2006), Microzonificación sísmica de Ibagué

Toro Ruíz J, Quintero Pinzón J, Del Río Gaitán J. Comparación del Análisis y Diseño Estructural entre la Microzonificación Sísmica de Ibagué y el Reglamento NSR-10. Universidad de Ibagué.

Fabián rojas barrales, de m, comisión I, sánchez m. del uso de registros compatibilizados con los espectros de respuesta para la generación de curvas de fragilidad. Universidad de Chile
Paredes Alexander (2019). Generación de Acelerogramas Sintéticos aplicables a la región de Quito-Ecuador.

Jorquera Andrés (2014). Catálogo de Terremotos Subductivos Chilenos para la Generación de Curvas de Fragilidad

Cárdenas Hernández, Cepeda Isidro. PROTOTIPO A ESCALA DE UN MODELO DE RESONANCIA EN EDIFICACIONES PARA EL LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

CRED (2016). International Dissaster Database. Universae Catholique de Louvain. Available online from: www.wmdat.be. Visited 31mar2016.

Réne Solan, Jorge Aguirre. Metodología para el cálculo de acelerogramas sintéticos utilizando funciones de transferencia empíricas y el método estocástico de Boore, en la ciudad de Tapachula, Chiapas. Universidad Nacional Autónoma de México

Salgado Mario A, Bernal Gabriel A, Yamin Luis E, Cardona Omar D. Evaluación de la amenaza sísmica de Colombia. Actualización y uso en las nuevas normas colombianas de diseño sismo resistente. Universidad de los Andes.

Baker, J. W. (2015b). Efficient Analytical Fragility Function Fitting Using Dynamic Structural Analysis. *Earthquake Spectra*, 31(1):579–599.

Baker, J. W. (2015a). Code supplement to "Efficient analytical fragility function fitting using dynamic structural analysis.

Bertero, R. D. and Bertero, V. V. (2002). Performance-based seismic engineering: The need for a reliable conceptual comprehensive approach. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31(3):627–652.

Cada, P. and Mónica, J. (2017). Comparison of methods used for seismic analysis of structures. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 13(0):20.

Carrillo, J. and Alcocer, S. M. (2012). Seismic performance of concrete walls for housing subjected to shaking table excitations. *Engineering Structures*, 41:98–107.

Chopra, A. K. (2012). *Dynamics of structures : theory and applications to earthquake engineering*. Prentice Hall.

Chopra, A. K. and Goel, R. K. (1999b). Capacity-Demand-Diagram Methods for Estimating Seismic Deformation of Inelastic Structures. Technical report, PEER 1999/02. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley

Clough, R. W. and Penzien, J. (1975). *Dynamics of structures*. McGraw-Hill Companies.

FEMA (2006). Next-Generation Performance-Based Seismic Design Guidelines, Program Plan for New and Existing Buildings. Technical report, FEMA 445. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C

FEMA (2012). Seismic Performance Assessment of Buildings. Technical report, FEMA P58. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C

Filiatrault, A. and Folz, B. (2002). Performance-Based Seismic Design of Wood Framed Buildings. *Journal of Structural Engineering*, 128(1):39–47.

Hou, S. (1968). Earthquake simulation models and their applications. Technical report, Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil Engineering.

Jennings, P. C., Housner, G. W., and Tsai, N. C. (1968). Simulated earthquake motions. Technical report, California Institute of Technology, Pasadena, California.

Liu, S.-C. (1969). Autocorrelation and power spectral density functions of the Parkfield earthquake of June 27, 1966. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 59(4):1475–1493.

Seismosoft (2016). *SeismoArtif 2016 - A computer program for generating artificial earthquake accelerograms matched to a specific target response spectrum*.