



*UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO*



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS:

*“CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE EDIFICIOS DE TIPO
RELIGIOSO EN EL CENTRO HISTÓRICO DE LA CIUDAD DE
MORELIA”*

PRESENTA:

FRANCISCO FILOGONIO HERNÁNDEZ OREJEL

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

Asesor:

DR. EN I. GUILLERMO MARTÍNEZ RUIZ

MORELIA, MICHOACÁN MARZO 2012.

CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE EDIFICIOS DE TIPO RELIGIOSO EN EL CENTRO
HISTÓRICO DE LA CIUDAD DE MORELIA

ÍNDICE

	Página
INTRODUCCIÓN.....	1
1. ANTECEDENTES.....	2
Desarrollo monumental.....	5
2. PROPIEDADES DINÁMICAS DE LOS SISTEMAS ESTRUCTURALES.....	7
3. CONJUNTO DE EDIFICIOS ESTUDIADOS.....	13
a) Análisis Histórico.....	14
b) Características Estructurales.....	42
4. PROPIEDADES DINÁMICAS EXPERIMENTALES DEL CONJUNTO ESTUDIADO	64
a) Medición de Vibración Ambiental.....	65
4.1 Campaña Experimental.....	66
4.1.1 Equipo Acelerométrico Empleado.....	68
4.1.2 Técnicas de Identificación Empleadas.....	69
5. SIMULACIÓN DE MONTE CARLO.....	79
6. CARACTERIZACIÓN DINÁMICAS.....	90
a) Período Fundamental y Amortiguamiento para Torres.....	91
b) Período Fundamental y Amortiguamiento para Naves.....	93
c) Período Fundamental y Amortiguamiento para Torres y Naves.....	95
d) Verificación de las Fórmulas Empíricas.....	97
7. CONCLUSIONES.....	105
Anexo I.....	106
Anexo II.....	113
REFERENCIAS.....	114



INTRODUCCIÓN

La Ciudad de Morelia cuenta con más de mil ciento trece edificios patrimoniales, cifra que respalda la gran riqueza monumental que posee la ciudad y que le ha valido ser reconocida como Patrimonio Cultural de la Humanidad por la UNESCO en el año 1991, distinción que ostenta hoy en día. Por desgracia se cuenta con muy pocos datos sobre este tipo de edificaciones, y en algunos casos se carece por completo de expedientes con la información necesaria para realizar un correcto diagnóstico para fines de intervención.

Sabemos que para la ingeniería estructural actual los edificios históricos representan un reto muy particular, ya que por su importancia y gran valor cultural existe el firme propósito de procurar su permanencia en el tiempo por medio de la conservación, restauración y rehabilitación. De ahí la relevancia en encaminar estudios que coadyuven en la identificación de daños ocultos bajo intervenciones “cosméticas”, buscando en todo momento ser respetuosos con su historia y concepción original apoyados en bases científicas rigurosas.

El planteamiento de métodos innovadores para la intervención estructural implica tener siempre en cuenta la necesidad de controlar el comportamiento estructural posterior a la misma, la reversibilidad y compatibilidad química y reológica entre los materiales existentes y los nuevos, así como procurar la mejora de las técnicas y procedimientos de intervención en concordancia con el actual avance tecnológico. En este orden de ideas, el presente estudio se centra en obtener de manera experimental y para niveles bajos de vibración el período fundamental y amortiguamiento de estructuras patrimoniales, con la finalidad de generar funciones representativas de dichos parámetros que correlacionados con los niveles de aceleración y propiedades dinámicas del sitio, puedan servir como indicadores preliminares del grado de daño esperado.





1. ANTECEDENTES

Los estudios de vulnerabilidad sísmica en edificaciones se han propagado en el contexto mundial, especialmente, en diferentes países latinoamericanos como México, Guatemala, Ecuador y Colombia. Estas naciones tienen en común el que fueron parte de colonias españolas, debido a esto la mayoría de las edificaciones de carácter histórico fueron elaboradas con técnicas constructivas que los españoles trajeron, que a su vez, se fusionaron y dieron origen a otras técnicas que emplearon como materiales principales la tierra, la piedra y la madera. Lo cual propició el nacimiento de la civilización que conocemos actualmente, así como el desenvolvimiento de las primeras ciudades.

Los estudios mencionados anteriormente parten de la necesidad de evaluar para fines de conservación las edificaciones patrimoniales. Son muchas las variables que inciden en el comportamiento de estructuras Religiosas con valor patrimonial; entre las cuales se encuentra el tiempo de la edificación, el tipo de proceso constructivo, la configuración estructural, ubicación de la zona sísmica, tipo de suelo, materiales, degradación por interperismo además de acciones históricas estáticas y dinámicas que podrían haber acumulado daños.

Para edificaciones de tipo religioso, se han hecho estudios de vulnerabilidad sísmica de iglesias históricas en territorio italiano a raíz de la crisis sísmica de Umbría-Marcas en 1997 (Nieto M, 2009); los cuales han servido para establecer metodologías para obtener la capacidad de este tipo de estructuras entre futuras demandas sísmicas.

Otras evaluaciones han sido realizadas después de los desastres ocasionados por terremotos como el caso de la Catedral de Cuzco (ver Figura 1), en Perú (Nieto M, 2009). En el Salvador se revisaron los daños sufridos en algunas edificaciones con base a las características sísmicas, el tipo de suelo, los efectos causados por cambio de configuración estructural durante los sismos de Enero y Febrero de 2001 y su impacto en las Iglesias del Patrimonio Cultural (Nieto M, 2009).



En Venezuela se han realizado algunos estudios en edificaciones de tipo religioso, como la evaluación y rehabilitación de la Iglesia del Corazón de Jesús en Mérida (ver figura 2), construcción de mampostería que bajo los efectos de sismos y de tráfico pesado, agrietó longitudinalmente la bóveda y las columnas laterales, logrando mediante este trabajo su recuperación (Nieto M, 2009). Todos estos estudios contribuyen, de una u otra forma a recuperar y mantener nuestra historia edificada, evaluando los diferentes elementos que influyen positiva o negativamente sobre estas estructuras.



Figura 1 Catedral de Cuzco, Perú.



Figura 2 Iglesia del Corazón de Jesús Mérida, Venezuela.



Referente a los estudios para la obtención experimental de las propiedades dinámicas en edificios existentes particularmente en el centro histórico de podemos asegurar que prácticamente nulos, solo se pueden mencionar uno de ellos fue el realizado para el Primitivo y Nacional Colegio de San Nicolás de Hidalgo (Martínez et al., 2009), y otro que fue llevado a cabo para la caracterización dinámica de las torres de la Catedral (Martínez et al., 2009).

En cuanto a la determinación de fórmulas empíricas para la evaluación de las características dinámicas de estructuras de mampostería solo España, Francia, Rumania, Albania, Cuba, Perú y República Dominicana tienen una fórmula específica para la evaluación del período fundamental incluida en sus normas. Referente a estudios adicionales relevantes realizados en otros países se tiene el caso de Portugal (Oliveira, 1997), quien obtuvo relaciones lineales entre el período y la altura del edificio, proponiendo además trabajar con otras variables para reducir la dispersión de los datos; así como el existente en España (Espinoza, 1999), que propone fórmulas con base en una muestra representativa de veintidós edificios de mampostería de las principales tipologías constructivas de la ciudad de Barcelona, buscando relacionar el periodo fundamental con parámetros como la altura y dimensión en planta.

Las fórmulas empíricas son evidentemente propias de cada región, época y técnicas constructivas, y se incurriría en errores importantes el intentar aplicar resultados extranjeros a edificios de nuestro país; es por lo anterior que el presente trabajo busca ser un primer referente de la caracterización dinámica experimental para el patrimonio michoacano, de cara a su preservación para las generaciones venideras.



Desarrollo Monumental

Durante el siglo XVII comenzó y se incrementó el desarrollo monumental de la ciudad de Morelia, y es a principios del mismo cuando se concluyeron los dos grandes conventos de San Francisco y San Agustín; a mediados, los de El Carmen y La Merced, además de otras iglesias, pero de forma relevante en 1660 se comenzó la construcción de la actual Catedral, la cual constituyó una de las edificaciones arquitectónicas de carácter religioso de mayores proporciones a las que se habían iniciado en todo el país. La ubicación del gran templo definió la composición y distribución de espacios del centro urbano, con un sabio y singular uso de la llamada «proporción áurea», que divide en dos plazas desiguales, pero en armonía, el centro de la ciudad; la mayor con portales, la menor con paramentos, pero sin portales, en una conjunción y ritmos de grandiosa originalidad. Sin embargo, el gran auge constructivo y de mayores frutos, ocurrió en el siglo XVIII; de él datan los menores y más numerosos monumentos que hoy embellecen y prestigian a la ciudad, tanto en lo religioso como en lo civil.

Al mediar el siglo XVIII se fundaron y construyeron grandes conventos de religiosas como lo son el de Las Monjas y Capuchinas así como el de San Diego destinado a Frailes, además de cinco iglesias, entre ellas la muy amplia dedicada a San José y media docena de capillas secundarias.

En 1744 se concluyeron las fachadas y grandiosas torres de la catedral. También es el siglo del máximo esplendor de la arquitectura civil, manifestándose ésta en los suntuosos edificios de educación y gobierno, como el Colegio seminario (hoy palacio de gobierno), el Colegio de los jesuitas (hoy Palacio Clavijero) y el Colegio de San Nicolás, Las Casas Reales (hoy palacio municipal), La Alhóndiga (hoy ampliación del Palacio de Justicia), más docenas de palacios y mansiones señoriales.



Durante el siglo de las Leyes de Reforma, se construyeron pocos edificios de carácter religioso y más bien se destruyen innumerables obras, pero en cambio, en esta época, se multiplican las residencias de carácter neoclásico que se acomodan sin atropello junto a los viejos palacios coloniales, como reflejo de reestructuración y el equilibrio social tan anhelado en esas fechas.

Al finalizar el siglo, se construían edificios tan importantes como el nuevo Seminario Tridentino junto a la Iglesia de San José, y el Colegio Teresiano (hoy Palacio Federal), ambos dirigidos por don Adolfo Tremontels, con un estilo neoclásico tan ornamentado que resulta de aspecto más abarrocado que el sobrio barroco tradicional de la ciudad. Al acumularse esta secuencia creativa, la ciudad se enriqueció; sólo en su centro histórico, Morelia cuenta con diez amplias plazas, unas cinco plazuelas y otras tantas rinconadas con fuentes públicas que, como espacios abiertos, puntualizan la trama de calles y barrios, los cuales están en torno a veinte iglesias y capillas de la época virreinal, entre las que también se ubican los numerosos palacios y mansiones.



2.- PROPIEDADES DINÁMICAS DE LOS SISTEMAS ESTRUCTURALES

Un sistema estructural es aquel que está formado generalmente por un arreglo de elementos básicos (elementos planos como las losas y muros, elementos curvos como lo son las membranas y cascarones o los elementos lineales: cables y tirantes).

El arreglo de estos elementos debe de ser tal que se pueda aprovechar las características peculiares de cada elemento y lograr la forma más eficiente del conjunto de dichos elementos (sistema estructural global), los cuales deberán de cumplir las restricciones impuestas por el funcionamiento de la construcción y por distintos aspectos como los son: la determinación de los materiales de los cuales va estar constituida la estructura, la forma global de ésta, el arreglo de sus elementos constitutivos y sus dimensiones y características más esenciales.

La bondad del resultado final del diseño depende en gran medida del acierto que se haya tenido en adoptar un sistema estructural, que resulte más adecuado para soportar las acciones a las que va estar sujeta la estructura y que mejor se adapte a las funciones que debe cumplir la edificación, incluyendo los procedimientos de construcción convenientes para la situación particular de la obra (Meli, 2008).



Las propiedades dinámicas son aquellas que describen el comportamiento de una estructura cuando esta se ve afectada por una acción o fuerza dinámica (sismo o viento), las cuales varían con respecto al tiempo; dicha variación puede ser en cuanto a su magnitud, dirección o sentido.

Dentro de las principales propiedades dinámicas podemos mencionar la Frecuencia, Periodo y el Amortiguamiento. Su evaluación permite conocer el comportamiento de una edificación ante diferentes demandas.

Estas propiedades están relacionadas con propiedades mecánicas tales como el Módulo de Elasticidad y de Cortante, así como con propiedades geométricas tales como el Momento de Inercia, longitud en planta y elevación, el acomodo de los elementos estructurales (sistema estructural), la masa y la rigidez ($K=F/d$).

Una descripción más general de tales propiedades es:

- **Frecuencia:** en la física se le conoce como la magnitud que mide el número de repeticiones por unidad de tiempo de cualquier fenómeno o suceso periódico. Para calcular la frecuencia de un suceso, se contabiliza el número de ocurrencias de este, teniendo en cuenta un intervalo temporal, luego estas repeticiones se dividen por el tiempo transcurrido, la cual es medida en hercios (Hz):

$$1 \text{ Hz} = \frac{1}{s}$$

Analíticamente en una estructura la frecuencia circular se obtiene a partir de la rigidez y la masa de la estructura:

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (\text{rad/seg})$$



Y a partir de esta se podrá conocer la frecuencia natural:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (Hz)$$

Partiendo de la definición de frecuencia y su aplicación analítica en las estructuras se puede concluir que la frecuencia en una edificación es la medida del valor de repetición o el número de ciclos en un tiempo específico, resultado de un movimiento vibratorio.

- **Periodo:** es el mínimo lapso que separa dos instantes en los que un sistema se encuentra exactamente en el mismo estado, es decir, mismas posiciones, mismas velocidades, mismas amplitudes. Así, el periodo es el tiempo empleado en completar una longitud de onda. En términos breves es tiempo que dura un ciclo de la onda en volver a comenzar.

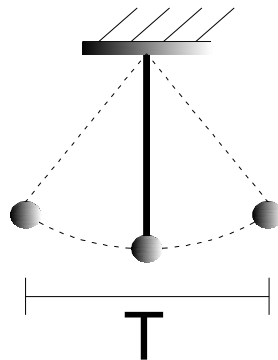


Figura 3 El péndulo es una manera muy simple de explicar el periodo de vibrar u oscilar en un sistema.



Por ejemplo, en una onda, el periodo es el tiempo transcurrido entre dos crestas o valles sucesivos.

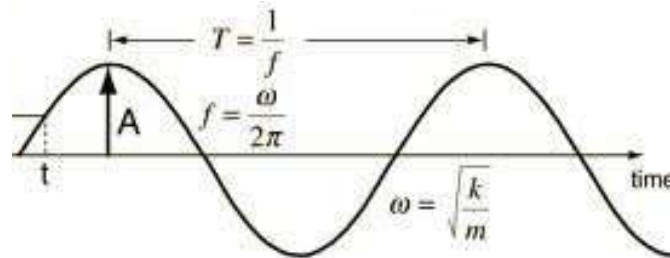


Figura 4 En la amplitud de una onda se puede ver representado el periodo.

El periodo (T) es el inverso de la frecuencia:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (\text{Seg.})$$

$$T = \frac{1}{f} \quad (\text{Seg.})$$

Entonces el periodo en una estructura, es el tiempo en que se cumple un ciclo de “vibrar” después de ocurrida una acción accidental (sismo o viento).

- **Amortiguamiento:** el amortiguamiento es el conjunto de fenómenos que disipan energía en sistema en movimiento. En el caso de las estructuras la disipación de energía, por amortiguamiento se debe a la interacción con elementos estructurales y no estructurales.

Además es un parámetro fundamental cuando se realizan estudios de vibraciones, en los cuales se desarrollan modelos matemáticos que permiten el estudio y análisis de “Sistemas Vibratorios”, como los son las



estructuras y otros elementos mecánicos como los motores, turbinas, etc.; los cuales van encaminados en suponer que todo sistema vibratorio tiene la capacidad de disipar energía; para el control de las vibraciones se utiliza el concepto de amortiguamiento como una técnica para disipar energía del sistema.

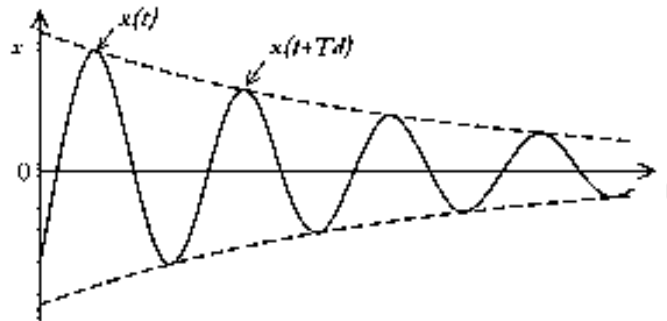


Figura 5 *Decaimiento de la amplitud de la vibración de un oscilador armónico amortiguado.*

Por ejemplo, si se tiene un sistema el cual posea masa y rigidez tendrá una frecuencia natural y además la capacidad de poder vibrar; si se le proporciona energía al sistema este tenderá a oscilar o si una fuerza externa actúa en el sistema con cierta frecuencia, el sistema podría entrar en un estado o condición de resonancia dinámica si existiera igualdad de frecuencias, lo que ocasionará que el sistema se vuelve inestable y dispuesto a fallar. En todo esto se fundamenta la importancia del estudio del amortiguamiento, principalmente en ingeniería.



Asimismo, existen diferentes tipos de amortiguamiento, según sea su naturaleza:

- ✦ **Amortiguamiento Viscoso:** se produce por la resistencia de un fluido al movimiento de un sólido, siendo el líquido viscoso o turbulento.

- ✦ **Amortiguamiento por Histéresis:** se ocasiona por la fricción interna molecular o histéresis, cuando se deforma un cuerpo sólido.

- ✦ **Amortiguamiento por Fricción seca:** es causado por la fricción cinética entre superficies deslizantes secas.

Entonces, una apropiada y realista determinación de las propiedades dinámicas de una edificación es importante para el análisis, diseño y revisión de la misma. Tradicionalmente, las oficinas de cálculo han utilizado expresiones aproximadas presentes en la normatividad sísmica para la determinación del periodo fundamental de vibración y de los amortiguamientos, pero en la actualidad se cuentan con otros métodos, con los cuales a partir del uso de tecnología (como lo es un acelerógrafo), se puede conocer estos parámetros con tan solo vibraciones ambientales.



3.- CONJUNTO DE EDIFICIOS ESTUDIADOS

La arquitectura en la ciudad de Morelia ha sido importante, desde su fundación en 1541 se han ido edificando notables obras arquitectónicas como la Catedral de Morelia, así como iglesias y conventos de las órdenes Franciscana, Agustina, Jesuita y Carmelita entre otras.

De gran relevancia se construyeron edificaciones de arquitectura civil como el Acueducto, las Casas Consistoriales, la Factoría de Tabacos y el Colegio de San Nicolás.

En su arquitectura se manifiestan diversas épocas y estilos, tales como el plateresco, manierismo, barroco y neoclásico, conjugándose en una unidad que en cada época tuvo extraordinarios constructores.

El estilo denominado barroco tablerado, presente en la Catedral de Morelia, permeó para otras edificaciones relevantes, como el Palacio Clavijero, Templo de Las Rosas, entre otros.

La riqueza arquitectónica con la cuenta la ciudad de Morelia, hace que la preservación de los monumentos históricos sea de gran importancia, a lo cual lleva a la necesidad de realizar estudios de carácter analítico, los cuales no atenten contra la integridad de dichas edificaciones y que puedan proporcionar la mayor cantidad de información para crear metodologías que sean útiles para su restauración y conservación.



a) Análisis Histórico

Para la presente investigación se estableció un conjunto de diez edificaciones patrimoniales emblemáticas de tipo religioso de la ciudad de Morelia construidas entre los siglos XVI y XVIII (ver tabla 1), tratando de cubrir un amplio rango de características estructurales generales tales como altura total, número y dimensiones de naves, disposición y tipo de arcadas, dimensiones en planta, etc.

Tabla 1 Construcciones Patrimoniales y su Época de edificación

Edificio	Época de Edificación
San Agustín	XVI
Biblioteca Pública	XVI
Templo del Carmen	XVI - XVII
San José	XVII
Catedral	XVII - XVIII
Capuchinas	XVIII
Templo de la Merced	XVIII
San Diego	XVIII
Templo de las Monjas	XVIII
Templo de las Rosas	XVIII



1. TEMPLO DE SAN AGUSTÍN



Figura 6 Templo de San Agustín (O. Segura, 2008).

Es una de las primeras obras monumentales que levantaron en la antigua Valladolid durante la segunda mitad del siglo XVI. Este conjunto conventual, tiene la particularidad de haber sido fundado dentro de una villa de población española, hecho poco común por que la función primordial era la evangelización de la población nativa. El conjunto constaba de templo, atrio, claustro y unas extensas huertas que abarcaban varias cuerdas de la actual ciudad. Se nota en la fachada (figura 6) la influencia plateresca, la entrada está enmarcada por columnas corintias y una cornisa en su parte superior. Al sur se observa una arquería que originalmente estaba abierta hacia el exterior. El templo está dedicado a Santa María de Gracia y en su fachada se puede apreciar el emblema agustino: el corazón atravesado por tres flechas.



Sus ventanas coloniales y su portería renacentista, como también la fachada de la iglesia con tendencias platerescas, destacan el trabajo de artífices nativos, dirigidos por alarifes de la propia comunidad. El interior de la iglesia ya no tiene el ambiente monacal de la mitad del siglo XVI.

La exuberancia ornamental notoria en el retablo mayor que se atribuye al arquitecto Francisco Eduardo Tres Guerras, como en los retablos laterales, corresponde al esplendor del siglo XIX (figura 7). En el retablo mayor se venera a la Virgen del Socorro, obra valiosa no sólo desde el punto de vista artístico, sino religioso porque fue donada a la comunidad agustina por Santo Tomás de Villanueva, arzobispo de Valencia, antes de su muerte en 1565. Es de notar, en el presbiterio la sillería que utilizaron los monjes en sus horas de coro. Una capilla lateral cercana a la sacristía, tiene el techo abovedado cubierto de pinturas al fresco; de sus paredes penden retratos al óleo realizados por varias personas entre las que destacan el artista criollo Javier Tapia, el del padre Basalenque, cronista de la orden; fray Juan Bautista de Moya, famoso evangelizador de la tierra Caliente y de los pueblos de la costa del pacífico; fray Alonso de la Veracruz, fundador del Colegio de Tiripetío en 1538 y, más tarde, ilustre maestro de la Universidad Real y Pontificia de México; Antonio de Huitziméngari, príncipe purépecha y alumno de Tiripetío, así como otros ilustres miembros de la comunidad agustina.

La iglesia tiene comunicación con el exconvento por la portería, situada en la parte exterior que conduce hacia el claustro, en cuyo patio, el surtidor de una fuente vierte su precioso líquido. La taza central de esta fuente con brocal barroco de trazo mistilíneo, fue pila bautismal en primitiva catedral.



Figura 7 Interior del Templo de San Agustín (O. Segura, 2008).

El techo del cubo de la escalera que conduce a las dependencias de clausura, es de marcado estilo gótico; el claustro superior tiene techumbre con vigas de madera, y en sus paredes se observa una cenefa pintada al fresco y arquería apainelada sobre columnas toscanas. Las crujías de los lados poniente y sur, dan acceso a las celdas monacales, todas ellas abovedadas (figura 8).



Figura 8 Vista de las Crujías y Acceso (O. Segura, 2008).



2. BIBLIOTECA PÚBLICA UNIVERSITARIA



Figura 9 Biblioteca Pública Universitaria (O. Segura, 2008).

Originalmente el inmueble fue templo de la compañía de Jesús el cual empezó a construir en 1582 y gracias a la labor entusiasta de los padres Juan Sánchez y Pedro Gutiérrez, se logro levantar una pequeña casa e iglesia con las aportaciones económicas de destacados y piadosos habitantes de la ciudad así como el cabildo eclesiástico.

El primero de Diciembre de 1660, con la significativa donación del licenciado Rafael Rodríguez entonces Secretario del Arzobispo Ramírez del Prado, se inicio la “Suntuosa iglesia sacristía y retablo del altar mayor” conformando junto con el colegio de San Francisco Javier, hoy Palacio Clavijero, uno de los conjuntos culturales más importantes dedicados a las enseñanza y culto religioso de la época.



Se encuentra en la esquina de Avenida Madero Poniente y la calle de Nigromante, frente al lado oeste del Colegio Primitivo y Nacional de San Nicolás de Hidalgo. Su fachada (figura 9), sigue el estilo planimétrico de la ciudad, con base en el orden toscano, y el imafrente contiene interesantes bajorrelieves. La Biblioteca Pública Universitaria funciona en este inmueble desde 1930 (figura 10). Su acervo se forma con los volúmenes de las bibliotecas del seminario tridentino y de los conventos Agustino y Franciscano al cual se le agregaron posteriormente valiosas colecciones como la de Mariano de Jesús Torres. En ella se hallan ejemplares antiguos y modernos, así como una interesantísima recopilación de manuscritos de los jesuitas, hecha en 1767. El interior está decorado a la memoria del sabio naturalista moreliano don Manuel Martínez Solórzano.



a)



b)

Figura 10 (O. Segura, 2008).



3. TEMPLO DEL CARMEN



Figura 11 Templo del Carmen (O. Segura, 2008).

Es una de las edificaciones monásticas más antiguas y monumentales de Morelia; su construcción se inició en 1596 y prosiguió en los siglos XVII y XVIII, a los que corresponden sus cúpulas. El estilo de su iglesia destaca entre los de la ciudad, pues en lugar de una torre ostenta una espadaña sostenida por arcos botareles (figura 13).

El templo se levanta sobre una planta de cruz latina y se distingue por sus cúpulas edificadas en el siglo XVIII; las cuales sustituyeron la cubierta original construida a base de madera labrada, a dos aguas.

El claustro es de una sola planta y de pequeñas dimensiones, según lo estipulan las constituciones Carmelitas que no permitían la construcción de un segundo piso en torno al claustro principal, y está localizado al norte del templo. El claustro se encuentra circundado por cuatro portales, conformados cada uno de ellos por tres arcos desplantados sobre gruesos pilares moldurados.



Figura 12 *Fachada del Templo del Carmen (O. Segura, 2008).*



a)



b)

Figura 13 *Espadaña sostenida por arcos botareles o arbotantes (O. Segura, 2008).*



4. TEMPLO DE SAN JOSÉ



Figura 14 Templo de San José.

Gran monumento barroco que se localiza frente a la Plaza de la Reforma Agraria, también llamada de San José. El origen del templo se remonta al siglo XVII, y el mismo, a diferencia de otros templos, fue construido como centro de barrio y no como parte de un conjunto conventual. En su actual sede según la leyenda, en un día de lluvia el obispo Escalona y Calatayud se refugió en una choza que ahí existía, sitio donde encontró una imagen del Señor San José, por lo que ordenó que en esta loma fuese erigida una capilla. A iniciativa del Obispo Sánchez de Tagle, en 1776 se inicia la construcción formal del templo tomando como modelo una planta de cruz latina con eje oriente-poniente.



La portada lateral está compuesta por dos pilastras rematadas con guardamalletas en sustitución del capitel y rematados por un frontón quebrado, que alberga un nicho (figura 15).

Al templo se accede por una escalinata de cantería, luce una fachada sobria representativa del barroco moreliano, la portada flanqueada por los cuerpos de las torres se divide en tres franjas verticales y horizontales, con sus pilastras dóricas, jónicas y corintias; rematan la portada un reloj y cuatro pináculos (figura 14). Templo de una sola nave y cruciforme tiene una cúpula de tambor octogonal, y su fachada es suntuosa en su barroco tablero.



a)



b)

Figura 15 Fachada Lateral del Templo de San José (O. Segura, 2008).



5. CATEDRAL DE MORELIA



Figura 16 Catedral de Morelia (O. Segura, 2008).

El obispo de Michoacán se erigió con sede en Tzintzuntzan, conforme a una bula emitida por el papa Paulo III el 8 de agosto de 1536. El obispo Vasco de Quiroga trasladó esta diócesis a Pátzcuaro en 1540, y el obispo fray Juan Medina Rincón, en el año 1580, la fijo en Valladolid. Se intentó entonces levantar una catedral, pero antes de ser concluida un incendio la consumió por completo.

Fray Marcos Ramírez del Prado en 1640, se hizo cargo del episcopado y dispuso la construcción de la actual Catedral, que se inició en 1660 y fue terminada en 84 años más tarde. Este monumento a pesar de haber sido edificado en plena época del barroco, no se observa esa explosión ornamental; las torres, desde sus bases hasta la segunda cornisa y las paredes laterales, responden con severidad a ese estilo.



Las fachadas principal y laterales (figura 17 y 18) ostentan bajorrelieves en forma totalmente planimétrica, bajo los ordenes arquitectónicos grecorromanos, donde el barroco acusa su influencia en la ventanas ovoidales y en el enmarcamiento de los altos relieves, que se hallan sobre las puertas y en los remates de los frontispicios; en todo los demás responde a la peculiar ornamentación moreliana, en especial el segundo cuerpo de las torres allí las guardamalletas fueron aplicadas con profusión; ya en el tercer cuerpo cuando toman forma octogonal, manteniendo lo planimétrico, desaparecen las guardamalletas.

Todo este trabajo señala la última etapa donde las pilastras con sus capiteles jónicos llevan su entablamento completo. Integrándose a la armonía arquitectónica del paisaje moreliano, las barrocas torres de este monumento se alzan orgullosas (figura 19). Con sus 62 metros de altura son, dentro de un conjunto de su género, las más altas del continente.

El interior del recinto, de orden dórico, mantiene una suntuosa decoración en sus bóvedas y arquerías. La Catedral está formada por tres naves, la intermedia está cubierta por bóvedas de cañón con lunetos, y las laterales por bóvedas de aristas cuatripartitas. Las naves están enlazadas por un crucero central que corona una hermosa cúpula. La estructura neoclásica del ciprés de columnas compuestas, cubre un impresionante manifestador de plata, el más grande del país, en acabado totalmente barroco, obra del siglo XVIII. La pila bautismal es también de plata; hecha en el año 1790. Se dice que en ella bautizaron a Agustín de Iturbide.

En las capillas que se hallan a los lados de la entrada principal bajo las torres, la arquería responde a la resistencia de los muros exteriores. En la parte del coro hay un majestuoso órgano, que por calidad de su sonido es uno de los mejores de América Latina. En este magnífico instrumento, de fachada



churrigueresca los más destacados ejecutantes del mundo interpretan, anualmente extraordinarios conciertos. La sala capitular, ricamente decorada tiene al frente un Cristo de marfil, cuatro valiosos jarrones de manufactura china traídos a la Nueva España en la Nao de Manila, un pequeño cuadro del mismo origen que representa a la Sagrada Familia en figuras de marfil, y el báculo del primer obispo de Michoacán, don Vasco de Quiroga, juntamente con su sombrero episcopal. Engalanan las paredes objetos y reliquias de alto valor y dos pinturas de Cabrera: una que representa el Nacimiento de Cristo, y la otra el premonitorio Sueño de San José, que salvó a la Sagrada Familia llevándola a Egipto.

El aspecto interior de la Catedral de Morelia es resultado de cambios realizados a finales del siglo XIX: el órgano se colocó en el extremo norte alto de la nave central y la sillería fue trasladada atrás del ciprés, se reemplazaron los retablos barrocos con retablos de estilo neoclásico, se decoraron los muros con diseños que asemejan papel tapiz y se colocaron casetones en los intradós de los arcos y el ciprés en el presbiterio.

En su interior resguarda numerosas obras de arte entre las cuales destaca la venerada escultura en pasta de caña de “El Señor de la Sacristía” que data del siglo XVI y que se fabricó utilizando la técnica indígena a base de una estructura ligera de carrizo cubierta con parta de caña de maíz. Se conservan dos trabajos ejemplares de la platería virreinal, que son “el manifestador” ubicado en el altar mayor y “la pila bautismal” que se encuentra en el bautisterio, el primero es del siglo XVIII y la pila del siglo XIX.

Las cinco puertas exteriores de madera que dan el acceso al recinto tienen elaboradas decoraciones metálicas distribuidas alrededor de un emblema Pontificio. Las interiores que vestibulan el ingreso están recubiertas con cuero y trabajadas con grabados policromos.



Figura 17 Fachada Principal de la Catedral de Morelia (O. Segura, 2008).



Figura 18 Fachada Lateral de la Catedral de Morelia (O. Segura, 2008).



a)



b)



c)

Figura 19 Torres de la Catedral de Morelia (O. Segura, 2008).



6. TEMPLO DE CAPUCHINAS



Figura 20 Templo de Capuchinas (O. Segura, 2008).

El templo barroco con planta de cruz latina y sus anexos fueron construidos en el primer tercio del siglo XVIII, para dar albergue a indias nobles llegando a alojar en el siglo XIX a 33 religiosas que vivían bajo los principios franciscanos de pobreza. En el templo se veneraba a una imagen de la virgen de Cosamaloapan, localizada originalmente en una pequeña capilla ubicada en el sitio donde se construyó el conjunto.

La esbelta torre de tres cuerpos con su capulín rematado por una cruz (figura 21 b), luce en las aristas del segundo cuerpo unas columnas salomónicas, mientras que en su fachada principal (figura 21a), presenta una gran cantidad de elementos ornamentales entre los que destaca la escultura de San Francisco de Asís. La efigie de San Miguel Arcángel se localiza en un nicho de fachada lateral.



La nave del templo está cubierta por una bóveda de lunetos y una cúpula semicircular en el crucero. El retablo principal y el lateral (figura 22 a), ubicado en el brazo oriente del crucero son de estilo neoclásico, mientras que los otros tres retablos de madera son barrocos.



a)



b)



c)

Figura 21 Fachada y Torre del Templo de Capuchinas (O. Segura, 2008).



a)



b)

Figura 22 (O. Segura, 2008).



7. TEMPLO DE LA MERCED



Figura 23 Templo de la Merced (O. Segura, 2008).

Aunque los mercedarios religiosos se habían establecido en Valladolid desde 1604, no fue hasta 1751 que se pudo terminar la construcción del templo y claustro que ese entonces se encontraba en la periferia de la ciudad. El edificio es modesto y fue lento su proceso de construcción debido a las limitaciones económicas de la orden; sin embargo, el origen barroco dieciochesco de este templo se observa en la fachada (figura 24), particularmente en la adornada ventana coral y las pilastras estípites que flanquean a la entrada. Este tipo de pilastras conjugan varias figuras geométricas usualmente se utilizaba en retablos integrados a los paramentos, este caso es peculiar por que las pilastras se encuentran separadas a la fachada y son de grandes dimensiones.

La decoración interior del templo es de corte neoclásico con columnas jónicas estiradas de color oro (figura 25). Su cúpula, apoyada en pechinas son imágenes de los cuatro evangelistas, baña de luz el altar.



Su interior fue remodelado por el Pbro. Teofanes López siguiendo las normas del neoclásico. Tiene dos fachadas al oriente, una del siglo XVIII, muy singular dentro de la arquitectura moreliana, que conserva su puerta original; la otra portada, al lado norte, proveniente del siglo XVII, es de tipo manierista; no así su cúpula, de características barrocas. La iglesia consta de una sola nave sin crucero. Sus bóvedas son de lunetos y la cúpula, de tambor octogonal, añadida en el siglo XVIII, se encuentra asentada entre pechinas en las que figuran en relieve cuatro religiosos mercedarios.



a)



b)

Figura 24 Fachada del Templo de la Merced (O. Segura, 2008).



a)



b)



c)

Figura 25 Interior del Templo de la Merced (O. Segura, 2008).



8. TEMPLO DE SAN DIEGO (SANTUARIO DE GUADALUPE)

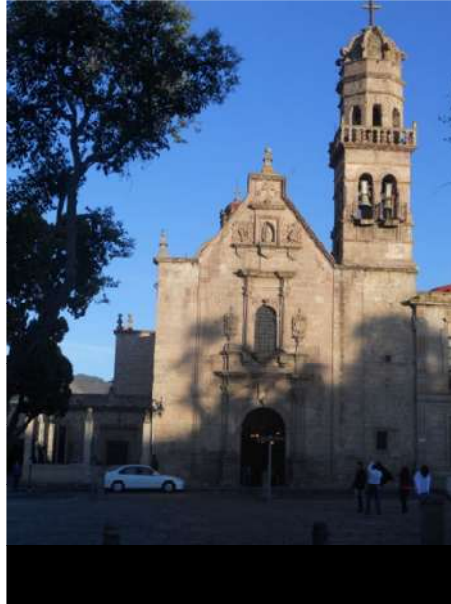


Figura 26 Templo de San Diego.

Desde principio del siglo XVIII se oficializó el culto guadalupano en la ciudad de Valladolid, por lo que al parecer se inicia la construcción del Santuario de Guadalupe en 1708 y se concluye en 1716; esta obra corrió por cuenta del obispo de Michoacán García de Legaspi y Velasco y tiempo después, en 1747, fue cedido a la provincia de San Diego de Franciscanos Descalzos de México.

Para 1732 el templo ya se encontraba adornado con blandones, lámparas y vidrierías; además, se contaba con una hermosa calzada de cantería que partía del Acueducto en el poniente y terminaba en la puerta principal del templo. Estas obras se realizaron con una magnificencia característica del Obispo José Escalona y Calatayud.

Para 1777 se cambia la planta rectangular del templo al anexársele el crucero y el presbiterio, tomando así la forma de una cruz latina durante el primer tercio

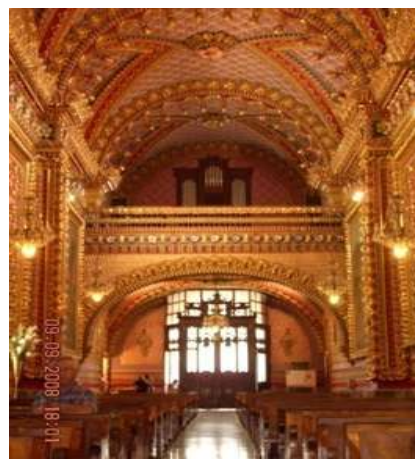


del siglo XIX, el arquitecto Nicolás Luna modifica el interior levantando el altar que actualmente lucen el ábside (figura 27 a).

El estilo arquitectónico de su portada muestra reminiscencias platerescas (figura 26). Todo su interior es un bellissimo trabajo de barro cocido y policromado realizado a principios del siglo XIX, el interior del templo fue decorado por el maestro Joaquín Orta Menchaca, ornamentación que aún conserva (figura 27 b).



a)



b)



c)

Figura 27 Interior del Templo de San Diego (O. Segura, 2008).



9. TEMPLO DE LAS MONJAS



Figura 28 *Templo de las Monjas.*

El templo de “Las Monjas” como se conoce localmente, se construyó en el siglo XVIII y formó parte del antiguo convento de Santa Catarina, construido entre los años 1729 y 1737, en plena era del barroco. Su fachada es muy severa con reminiscencias platerescas en la ornamentación de sus segundos cuerpos; su torre y cúpula son los mejores ejemplos de modalidad del barroco salomónico en la ciudad. En su interior (figura 29), merece admiración un Cristo yacente, hecho con caña de maíz y orquídeas en los tiempos de don Vasco de Quiroga. En pinturas cuenta con valiosos trabajos de maestros criollos que destacaran en la era del virreinato. Los retablos, de estilo neoclásico son posteriores a la construcción. Este templo está dedicado a Santa Catarina, y al que la voz popular bautizo con el nombre de Las Monjas, perteneció a la orden de las dominicas quienes, antes de 1738 en que en que se trasladaron a éste nuevo edificio, habían sentado sus reales en el exconvento hoy conocido como Conservatorio de las Rosas.



El traslado de las monjas fue un acontecimiento importantísimo en la ciudad de Valladolid, en él participo toda la ciudad tal como está retratado en una pintura al oleo que se conserva en el Museo Regional Michoacano.

El edificio tiene una disposición paralela a la calle principal y su portada doble de acceso en forma lateral a la nave (figura 30).

En la fachada y torre se aprecian los elementos decorativos característicos del barroco local como son las pilastras tableradas, las cornisas mixtilíneas y los nichos, que contienen las esculturas de Santa Catalina de Sena y de Santo Domingo. Sobresale en el perfil del conjunto la torre por su esbeltez y ligereza.



Figura 29 *Interior Templo de las Monjas (O. Segura, 2008).*



Figura 30 Fachada del Templo de las Monjas (O. Segura, 2008).

10. TEMPLO DE LAS ROSAS



Figura 31 Templo de las Rosas (O. Segura, 2008).

Se construyó esta iglesia en el curso de la segunda mitad del siglo XVIII donde originalmente estuvo el convento de las monjas dominicas. El frontispicio de doble imafrente edificado por disposición del obispo Martín de

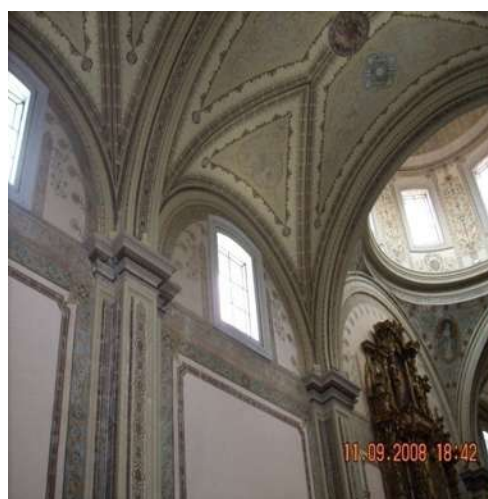


Elizacoechea, es dual arquitectónicamente y corresponde a los años 1746 y 1756. Sus portadas en su primer cuerpo son de orden toscano, y en su segundo cuerpo, son de orden jónico incluyendo sus bajorrelieves. Sus ventanas están enmarcadas por pilastras; los imafrentes son barrocos y se consideran los más bellos de la ciudad, tienen relieves con figuras de santos y emblemas. Un bien trazado contrafuerte divide las dos portadas, teniendo arriba una curiosa gárgola con figura de caimán y en la cúspide como remate la escultura de Santo Domingo. Las puertas de acceso a la iglesia son un trabajo de relieve, con figuras de santos y escudos nobiliarios episcopales, del lugar de origen del obispo Elizacoechea.

El interior de la iglesia tiene bóvedas de lunetos y cúpula (figura 32), y tres retablos churriguerescos donde varias pinturas cubren espacios, como es usual en este tipo de obras. El retablo mayor responde al mismo estilo largos estípites y un espacio central está cubierto por labores profusamente ornamentadas.



a)



b)

Figura 32 Interior del Templo de las Rosas (O. Segura, 2008).



Este edificio, como típico templo de monjas se construyó en forma paralela a la calle y su acceso está marcado por una doble portada barroca (figura 31), por lo que se colocó en su interior una reja que separaba el coro de la nave para que las monjas pudieran participar en la misa sin ser vistas (figura 33 a). Este es uno de dos templos en Morelia que aún conserva en su interior retablos barrocos (figura 34 b).



a)



b)



c)

Figura 33 Interior del Templo de las Rosas (O. Segura, 2008).



b) Características Estructurales

1. TEMPLO DE SAN AGUSTÍN



Figura 34 Descripción en planta del Templo de San Agustín (O. Segura, 2008).

El periodo de construcción de este edificio data de la segunda mitad del siglo XVI. Es una estructura de tipo conventual la cual consta de templo, atrio y claustro (figura 34); la iglesia está compuesta por una sola nave (figura 35), la cual está sostenida por muros formeros, los cuales en su lado norte contienen cuatro contrafuertes, dos de ellos reciben el empuje de los arcos triunfales que conforman el falso transepto o crucero (figura 36), mientras que el muro opuesto no se tienen los contrafuertes.



Figura 35 Nave del Templo de San Agustín.

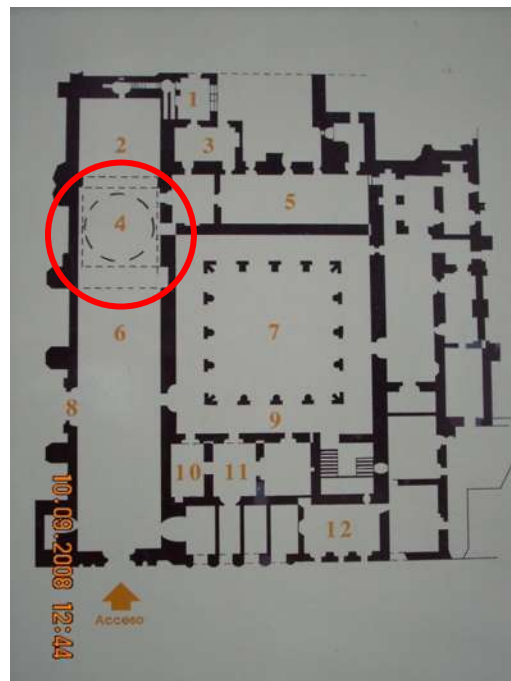


Figura 36 En el círculo rojo se resalta el falso crucero (O. Segura, 2008).



Cabe mencionar que dos de los contrafuertes tienen presencia de vegetación, lo cual puede suponerse como un indicio de que los núcleos de los mismos son de menor calidad (figura 37).



Figura 37 Presencia de vegetación (O. Segura, 2008).

La nave cuenta con una pequeña zona de relleno además de una cúpula nervada, y se encuentra adosada a una torre de tres niveles (figura 38). La altura de la torre es de 41 m aproximadamente y la nave de 17 m.

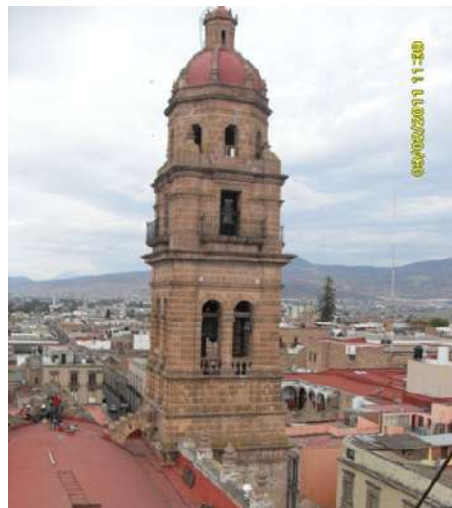


Figura 38 Torre del Templo de San Agustín (O. Segura, 2008).



2. BIBLIOTECA PÚBLICA UNIVERSITARIA

La construcción de este inmueble de tipo basilical del siglo XVI. Está edificado en una sola nave y cubierto por bóvedas de cañón con lunetos (figura 39); en la figura 40 se pueden apreciar las características del coro.



Figura 39 Nave de la Biblioteca Pública (O. Segura, 2008).



Figura 40 Coro de la Biblioteca Pública (O. Segura, 2008).



La cúpula de este edificio forma parte de un cimborio masivo (figura 41); y las torres en esta iglesia en particular (figura 42), son de baja altura comparativamente con las otras iglesias del centro histórico de la Ciudad de Morelia.



Figura 41 Cúpula de la Biblioteca Pública (O. Segura, 2008).



Figura 42 Torres de la Biblioteca Pública (O. Segura, 2008).



3. TEMPLO DEL CARMEN



Figura 43 Planta del Conjunto Conventual del Carmen (O. Segura, 2008).

Edificio de tipo conventual construido entre los Siglos XVI – XVII con un fuerte grado de irregularidad en planta. La iglesia consta de una sola nave y con ábside rectangular. Además el crucero de este templo deriva a la capilla y la sacristía, y cuenta con una conexión con el claustro (figura 43) el cual como ya se ha hecho mención es de una sola planta.

La nave tiene zonas de relleno significativas; el cimborio de esta estructura es de gran altura y de peso considerable (figura 44). Resaltando que esta iglesia en particular no cuenta con una torre, sino que ostenta una espadaña sostenida por arcos botareles (figura 45).



Figura 44 Cimborio del Carmen.



Figura 45 Espadaña, Templo del Carmen (O. Segura, 2008).



4. TEMPLO DE SAN JOSÉ

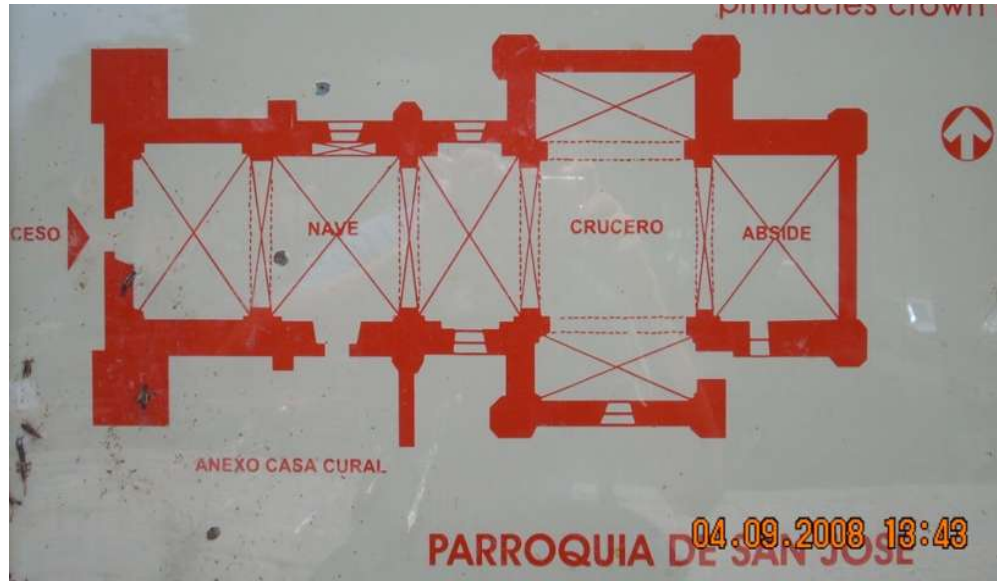


Figura 46 Croquis de la Planta del Templo de San José (O. Segura, 2008).

Construido alrededor del Siglo XVII fue elaborado como centro de barrio y no como parte de un conjunto conventual, a diferencia de otros templos. Esta es una estructura simétrica, de una sola nave y cruciforme (figura 46), con una cúpula de tambor octogonal.

Las dos torres con las que cuenta este templo prácticamente son cuadradas, estas están distribuidas en tres niveles (figura 47), y además se encuentran adosadas a la estructura del templo; es decir, que estas no están incluidas. La nave con crucero tiene relleno considerable y los muros formeros tienen aberturas simétricas (figura 46).

Se puede apreciar que esta iglesia históricamente ha tenido daños y aunado a eso el mantenimiento a la misma ha sido el mínimo (figura 48).



Figura 47 Torre en tres Niveles.



a) (O. Segura, 2008)



b)

Figura 48 Deterioro y poco mantenimiento visible.



5. CATEDRAL DE MORELIA



Figura 49 Imagen de la distribución en planta de la Catedral de Morelia (O. Segura, 2008).

Estructura construida entre el Siglo XVII y XVIII, compuesta por tres naves, capillas laterales y dos torres incluidas (figura 49), un ábside rectangular y su coro, el cual además cuenta con un espacio para un órgano.

Las naves están enlazadas por crucero central que corona una cúpula, con un cimborio de tambor octogonal con muros de gran espesor (figura 50).



Figura 50 Cúpula de la Catedral de Morelia (O. Segura, 2008).

Las torres están formadas por seis niveles, conformadas con un cuerpo y tres campanarios (figura 51). Es el único edificio de tipo religioso que tiene arbotantes, también tiene pilastras en lugar de contrafuertes.

De acuerdo con la teoría de arcos debería de transmitirse el empuje de la nave principal a los muros formeros, condición que se desconoce ya que en apariencia los arbotantes no parecen conectarse con los muros formeros (figura 52).

Otra de las cosas que es conveniente mencionar es la evidente desproporción que existe entre las torres y la nave principal (figura 53), la torre tiene 62 m hasta la cruz aproximadamente y la nave 22 m aproximadamente, lo cual es de esperarse que impacte de alguna forma en el comportamiento estructural global.



Figura 51 Torre (O. Segura, 2008).



Figura 52 Arbotantes (O. Segura, 2008).



Figura 53 Evidente diferencia de altura entre las Torres y la Nave Principal (O. Segura, 2008).



6. TEMPLO DE CAPUCHINAS

Iglesia construida en el Siglo XVIII, es de tipo conventual en dos niveles, la planta del templo en forma de cruz con una sola nave con bóveda de lunetos, la cual tiene un relleno considerable y una cúpula semicircular ubicada en el crucero. La torre esbelta de un cuerpo y dos campanarios y su cupulín, ésta está incluida en el conjunto.

Este templo es una de las muestras visibles del poco respeto hacia los edificios históricos en la ciudad de Morelia, ya que presenta una drástica intervención en la torre, a base de marcos interiores de concreto reforzado (figura 54).



a)



b) (O. Segura, 2008)

Figura 54 Intervención en la Torre del Templo de Capuchinas.



7. TEMPLO DE LA MERCED

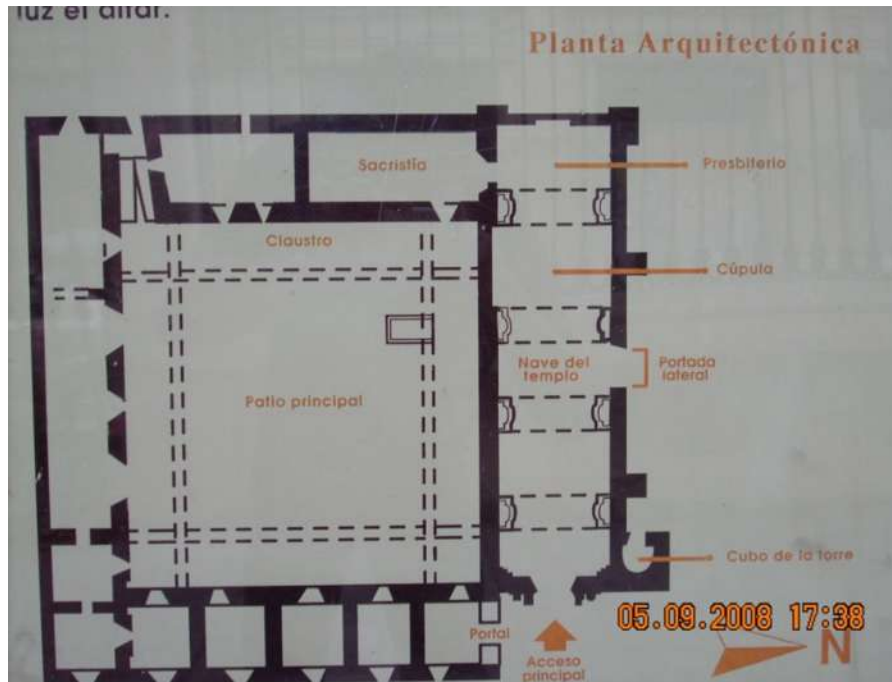


Figura 55 Planta Arquitectónica del Conjunto Conventual de la Merced (O. Segura, 2008).

Estructura conventual que data del Siglo XVIII. En comparación a otras estructuras del mismo tipo es relativamente pequeña y consta de una sola nave sin crucero, con bóvedas de lunetos (figura 56), una cúpula sobre un tambor octogonal (figura 57), al centro de un falso transepto (figura 55).

Únicamente el muro formero norte cuenta con contrafuertes. Presenta una sola torre, parcialmente incluida, la cual presenta cierto grado de esbeltez y planta rectangular (figura 58).



Figura 56 *Bóveda de lunetos.*

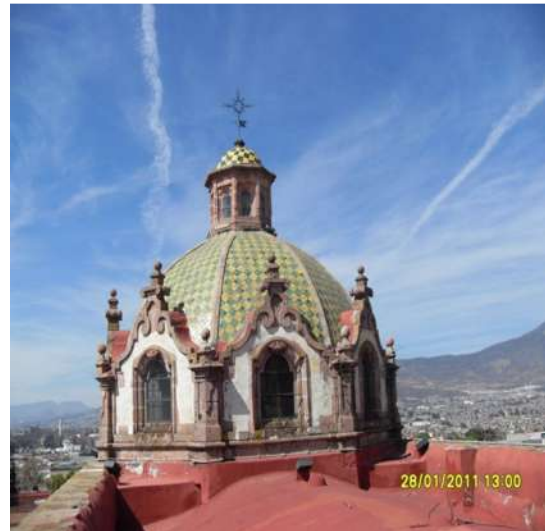


Figura 57 *Cúpula.*



Figura 58 *Torre.*



8. TEMPLO DE SAN DIEGO (SANTUARIO DE GUADALUPE)

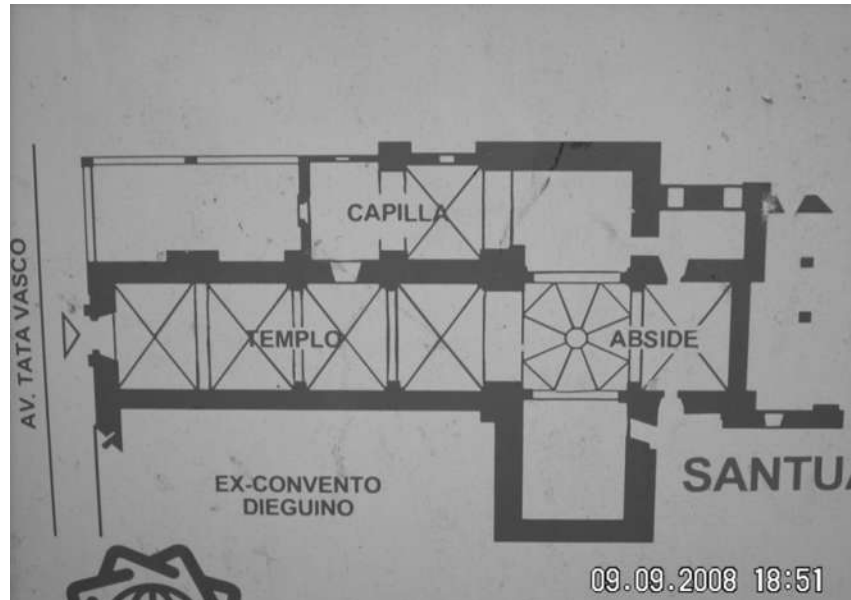


Figura 59 *Planta Arquitectónica del Templo de San Diego (O. Segura, 2008).*

Estructura de tipo conventual construida a inicios del Siglo XVIII formada por una sola nave. Cuenta con transepto, ábside rectangular y una sola capilla lateral (figura 59).

La nave es de cañón corrido con zonas de relleno considerables las cuales incrementan de forma importante su peso propio (figura 60). Sobre la portada se tiene un imafronte de forma piramidal con altura considerable (figura 61) y la torre que está formada de un cuerpo inferior y dos campanarios hasta llegar a la cúpula. El primer campanario de forma rectangular y el segundo al igual que la cúpula con forma octogonal (figura 62).

Cabe mencionar que en algún momento, decidieron levantar un muro de mampostería para “delimitar” la iglesia y la actual Facultad de Derecho (figura 63).

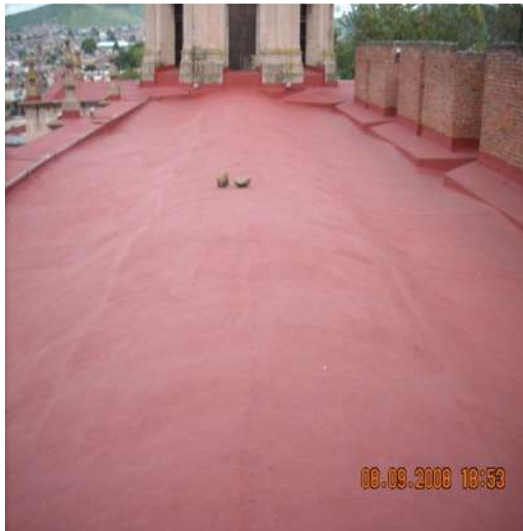


Figura 60 Zonas de relleno sobre los riñones de la bóveda de cañón (O. Segura, 2008).



Figura 61 Vista posterior del Imafrente (O. Segura, 2008).

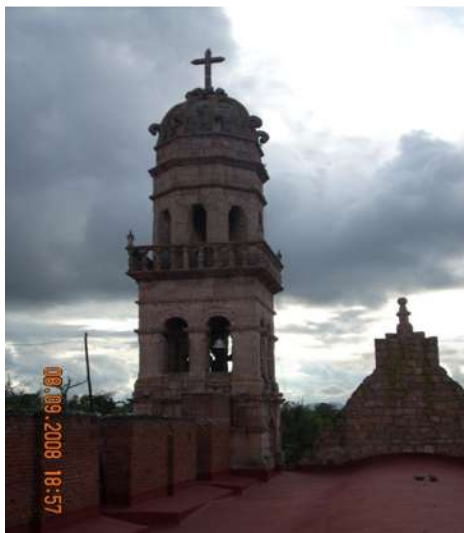


Figura 62 (O. Segura, 2008).



Figura 63 Muro de mampostería.



9. TEMPLO DE LAS MONJAS



Figura 64 *Planta Arquitectónica del Templo de las Monjas (O. Segura, 2008).*

Estructura de tipo conventual construida en el Siglo XVIII, formada por una sola nave con un falso transepto; las bóvedas son de cañón corrido, con una torre adosada (figura 64) de sección cuadrada que sobresale del conjunto por su esbeltez.

La torre en dos niveles a diferencia de otras torres de las iglesias en la zona no finaliza con una cúpula, sino que esta termina con una corta “aguja” de piedra (figura 65).



Figura 65 Torre.

10. TEMPLO DE LAS ROSAS

Estructura conventual construida en la segunda mitad del Siglo XVIII, formada por una pequeña nave con falso crucero, bóvedas de cañón con lunetos y arcos fajones (figura 66), un muro formero con contrafuertes que dividen las dos portadas de la fachada norte (figura 67), cúpula y un cimborio de altura intermedia (figura 68).



Figura 66 *Bóvedas de cañón con lunetos (O. Segura, 2008).*



Figura 67 *Contrafuertes sobre el muro formero norte.*



Figura 68 *Cúpula.*



Tabla 2 Resumen de Alturas de las Torres.

Edificio	Alturas de Torre (m)
Templo de las Rosas	-
Catedral	62
San Agustín	40.92
San José	39.66
Capuchinas	37.75
Templo de la Merced	31.33
San Diego	28
Templo de las Monjas	27.34
Templo del Carmen	27.33
Biblioteca Pública	25.39

Tabla 3 Resumen de Alturas de las Naves.

Edificio	Alturas de Nave (m)
Templo de las Rosas	15.7
Catedral	19.05
San Agustín	17.35
San José	19.26
Capuchinas	-
Templo de la Merced	11.69
San Diego	13.11
Templo de las Monjas	13.58
Templo del Carmen	15.96
Biblioteca Pública	14.86



Como se puede ver en la tablas 2 y 3 las alturas tanto para las torres como para las naves de los edificios por analizar son muy variadas, además que cada caso presenta una configuración estructural única, lo cual tiene una gran influencia en el comportamiento dinámico esperado de los mismos.

Adicionalmente, es evidente que el comportamiento estructural del conjunto se ha modificado durante su historia bien sea por deterioros o intervenciones pasadas, por lo que su caracterización dinámica implica el conocimiento de una gran cantidad de variables prácticamente imposibles de determinar con precisión.



4.- PROPIEDADES DINÁMICAS EXPERIMENTALES DEL CONJUNTO ESTUDIADO

Para poder conocer los cambios en las características dinámicas de los edificios, es necesario recurrir a la instrumentación sísmica para obtener datos experimentales.

Esta implica determinar la cantidad y ubicación adecuada de los dispositivos necesarios para conocer la respuesta de las estructuras.

A pesar de su importancia al contribuir a la comprensión de la respuesta dinámica de estructuras ante sismos de gran intensidad, además de un mejor entendimiento de su potencial de daño, la instrumentación sísmica de edificios frecuentemente se limita a determinar sus características dinámicas.

Para poder cuantificar el daño en las estructuras a partir de sus características dinámicas, es necesario determinar cuál es el cambio en alguno o algunos de sus parámetros estructurales para obtener la variación observada de acuerdo con el comportamiento dinámico conocido. Para ello se han desarrollado diferentes métodos en los se comparan frecuencias y modos de vibración de las estructuras. En algunos casos, la comparación se hace a nivel global de la estructura (frecuencias o periodos de vibración).

Los criterios anteriores se pueden utilizar para comparar la respuesta dinámica experimental de una misma estructura en diferentes etapas de su vida útil y establecer si existe un cambio en ella.



a) Medición de Vibración Ambiental

Los registros sísmicos presentan perturbaciones causadas por lo que se llama *ruido de fondo*. Las perturbaciones más frecuentes se deben a causas atmosféricas, electromecánicas y culturales.

Tradicionalmente el ruido ha sido considerado como algo negativo, molesto y que hay que cancelar o evitar. En la actualidad, lo que hasta hace pocas décadas era un estorbo en los estudios de propagación y atenuación de ondas sísmicas se convertido en una excelente herramienta para caracterizar los efectos locales y propiedades dinámicas del lugar de registro y de las estructuras. Así pues, para los estudios de la vibración ambiental el ruido es la señal y las ondas que lo integran se suelen llamar microtemblores, microvibraciones, *vibración ambiental o ruido cultural*.

La vibración ambiental se genera principalmente por la actividad humana (figura 69) y se debe al funcionamiento de maquinaria industrial y al tráfico de vehículos. Además también contiene vibraciones producidas por el viento, que son introducidas en el subsuelo por los árboles, edificios o por su impacto con el relieve. Su fuente no está asociada a terremotos y algunos investigadores consideran que el ruido de origen natural está formado por ondas superficiales de vibración del planeta, cambios atmosféricos y actividad volcánica interna, además de las fuentes artificiales anteriormente citadas (Espinoza, 1999).



Figura 69 *En una ciudad la principal fuente de vibración ambiental es la actividad humana.*

4.1 CAMPAÑA EXPERIMENTAL

Para la caracterización dinámica experimental del conjunto de edificios se optó por realizar mediciones de vibración ambiental, tomando muestras de aceleraciones en sus puntos de mayor altura, ya que se ha demostrado que en esas zonas se logra obtener buenos resultados cuando se desea conocer el periodo fundamental de un edificio (Espinoza, 1999). Se realizaron entonces mediciones sobre naves y torres (ver figura 70 y 71) efectuando registros de 5 minutos con una tasa de 200 muestras por segundo, buscando los puntos físicamente más estables para la correcta colocación del equipo.



Figura 70 Medición con equipo acelerométrico ETNA en Nave de edificio tipo religioso (Templo de las Monjas).

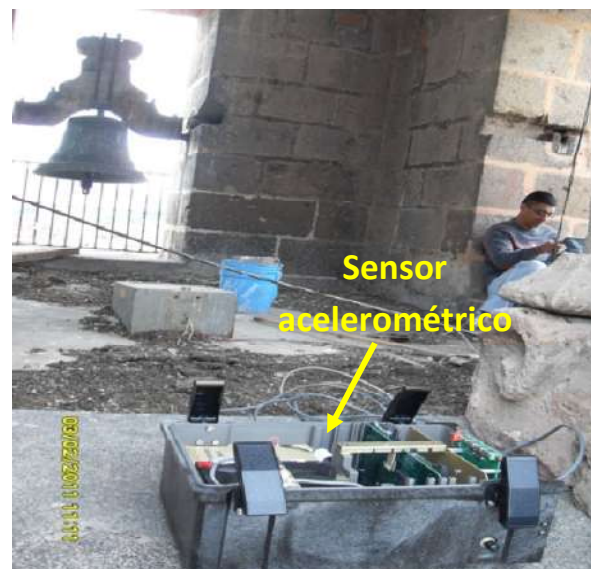


Figura 71 Medición realizada en una torre de un edificio tipo religioso (Templo de San Agustín)



En todos los casos se utilizó equipo topográfico para la determinación de la altura de las estructuras, por ser este el parámetro para el que se ha observado la mejor correlación con el período fundamental en las estructuras de mampostería (Espinoza, 1999).

4.1.1 Equipo acelerométrico empleado

Para este caso se utilizó un equipo ETNA de Kinematics (figura 72) el cual resulta práctico y de buena facilidad de manejo para este tipo de estudios; este acelerógrafo fue diseñado para satisfacer el monitoreo de terremotos y se ha empleado con éxito en la medición de vibración ambiente. Basado en la tecnología Kinematics “Altus” (Kinematics, 2008), el ETNA, tiene una resolución de 18 bits aunado a un rango dinámico de 108 db, y viene equipado con un episensor triaxial interno y una tarjeta de memoria “PCMCIA”.



Figura 72 Acelerógrafo ETNA de Kinematics

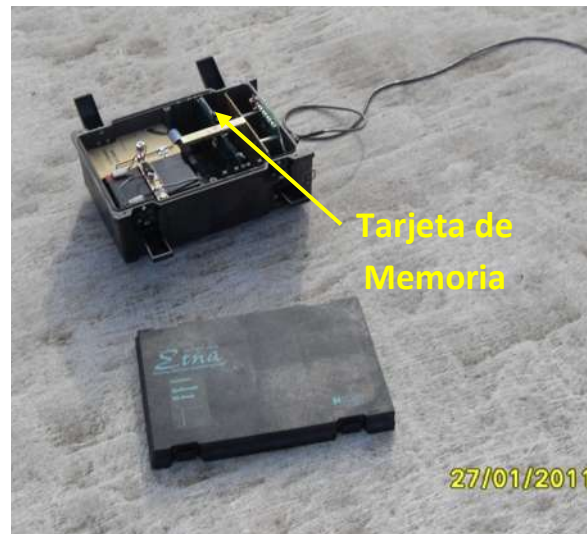


Figura 73 *Acelerógrafo ETNA.*

4.1.2 Técnicas de Identificación empleadas

Existen diferentes técnicas de identificación, entre las que destacan la *FDD* (Descomposición en el Dominio de la Frecuencia), el cual es un método fácil de usar. Donde se pueden seleccionar los picos de resonancia de los modos dando un solo clic sobre el grafico y el FDD de vuelve una estimación de la frecuencia natural y de los coeficientes de amortiguación. Así como la *EFDD* (Descomposición Mejorada en el Dominio de la Frecuencia), al igual que el FDD se puede obtener la frecuencia natural y coeficiente de amortiguamiento, pero se diferencia en que el EFDD se obtiene mediante la estimación en el dominio del tiempo.

Para el procesamiento de los registros de vibración ambiental obtenidos sobre el conjunto de edificios estudiados, se utilizó la técnica conocida como *FDD* (Descomposición en el Dominio de la Frecuencia), empleando el software



especializado ARTeMIS Extractor (svibs, 2011), el cual es una herramienta efectiva para la identificación modal utilizando técnicas no paramétricas, las cuales se caracterizan por no contar con una señal de entrada en el sistema. Las mediciones de vibración ambiental fueron procesadas de acuerdo a los estudios Bendat y Piersol (Bendat J.S., Piersol AG., 1993). La relación entre las entradas $x(t)$ y los puntos medidos $y(t)$ pueden ser expresados como se describe a continuación:

$$G_{yy}(j\omega) = \bar{H}(j\omega)G_{xx}(j\omega)H(j\omega)^T \quad (1)$$

Donde $G_{xx}(j\omega)$ es la matriz de densidad espectral de orden $(r \times r)$, siendo r el número de entradas, $G_{yy}(j\omega)$ es la matriz de respuestas de orden $(m \times m)$, donde m es el número de respuestas, $H(j\omega)$ es la matriz de funciones de respuesta para la frecuencia de orden $(m \times r)$ y $\bar{H}$ y el superíndice T denotan el complejo conjugado y la transpuesta, respectivamente. La función de respuesta a la frecuencia puede escribirse en fracciones parciales de la siguiente forma:

$$H(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{R_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{\bar{R}_k}{j\omega - \bar{\lambda}_k} \quad (2)$$

Donde n es el número de modos, λ_k es el polo y R_k es el residuo que dado por:

$$R_k = \phi_k \gamma_k^T$$

ϕ_k y γ_k son el vector de las formas modales y vector de la participación modal respectivamente. Si la entrada es una señal de ruido blanco, su densidad espectral de potencia es una matriz constante y $G_{xx}(j\omega) = C$, por lo que la ecuación (1) quedaría:



$$G_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \sum_{s=1}^n \left[\frac{R_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{\bar{R}_k}{j\omega - \bar{\lambda}_k} \right] \times C \left[\frac{R_s}{j\omega - \lambda_s} + \frac{\bar{R}_s}{j\omega - \bar{\lambda}_s} \right]^H \quad (3)$$

Donde el superíndice H denota el complejo conjugado. Multiplicando ambas fracciones parciales y haciendo uso del teorema “Heavyside”, la densidad espectral de potencia de salida puede reducirse a la forma presentada en la siguiente ecuación:

$$G_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \left[\frac{A_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{\bar{A}_k}{j\omega - \bar{\lambda}_k} + \frac{B_k}{-j\omega - \lambda_k} + \frac{B_k}{-j\omega - \bar{\lambda}_k} \right] \quad (4)$$

Donde A_k es el residuo de la matriz de densidad espectral de potencia de salida. La matriz residual es de tipo Hermitiano de orden $m \times m$, y está dada por:

$$A_k = R_k C \left(\sum_{s=1}^n \frac{\bar{R}_s^T}{-\lambda_k - \bar{\lambda}_s} + \frac{R_s^T}{-\lambda_k - \lambda_s} \right) \quad (5)$$

La contribución residual del modo K^{th} está dada por:

$$A_k = \frac{R_k C \bar{R}_k^T}{2\alpha_k}$$

Donde λ_k es, $\lambda_k = -\alpha_k + j\omega_k$



Como se muestra, este término se vuelve dominante cuando el amortiguamiento es ligero. En este caso, el residuo se vuelve proporcional al vector de formas modales:

$$A_k \propto R_k C \bar{R}_k = \phi_k \gamma_k^T C \gamma_k \phi_k^T = d_k \phi_k \phi_k^T \quad (6)$$

Donde d_k es un escalar constante. En una determinada frecuencia ω solo un número limitado de modos contribuirán significativamente, típicamente solo uno o dos modos. Denotaremos al conjunto de modos como $Sub(\omega)$, por lo que para el caso de una estructura ligeramente amortiguada, la respuesta de la densidad espectral puede siempre ser escrita como (Rojas R., 2011):

$$G_{yy}(j\omega) = \sum_{k \in Sub(\omega)} \frac{d_k \phi_k \phi_k^T}{j\omega - j_k} + \frac{\bar{d}_k \bar{\phi}_k \bar{\phi}_k^T}{j\omega - \bar{j}_k} \quad (7)$$

Los resultados obtenidos una vez realizado el procesamiento son arrojados en forma de espectro de frecuencias en el cual se puede identificar mediante una técnica conocida como “Peak Picking” (Bendat, 1993), las frecuencias asociadas a los modos de vibrar del edificio analizado; en la siguientes figuras se ilustra el procesamiento realizado para las torres (figura 74 a 78) y naves (figura 79 a 83) de los edificios estudiados.

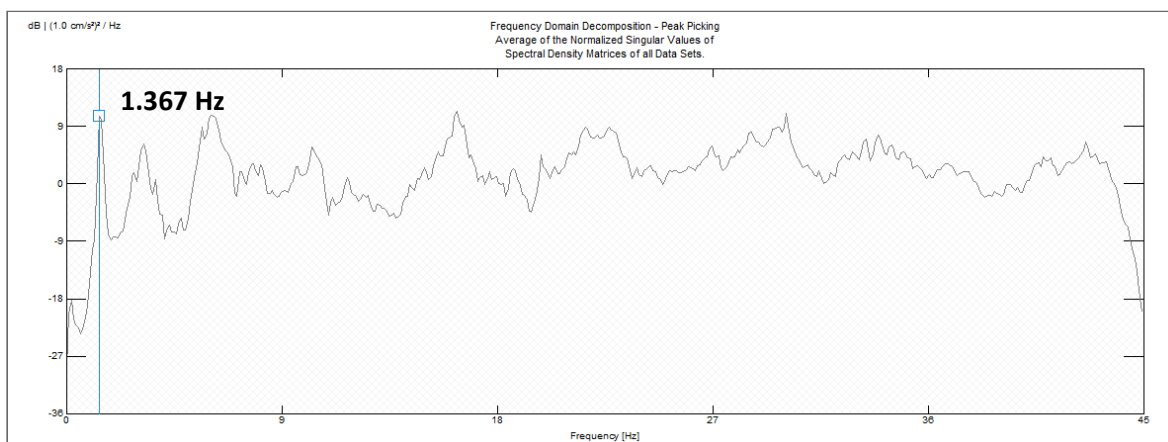


Figura 74 Torre de Catedral de Morelia, $f = 1.367$ Hz.

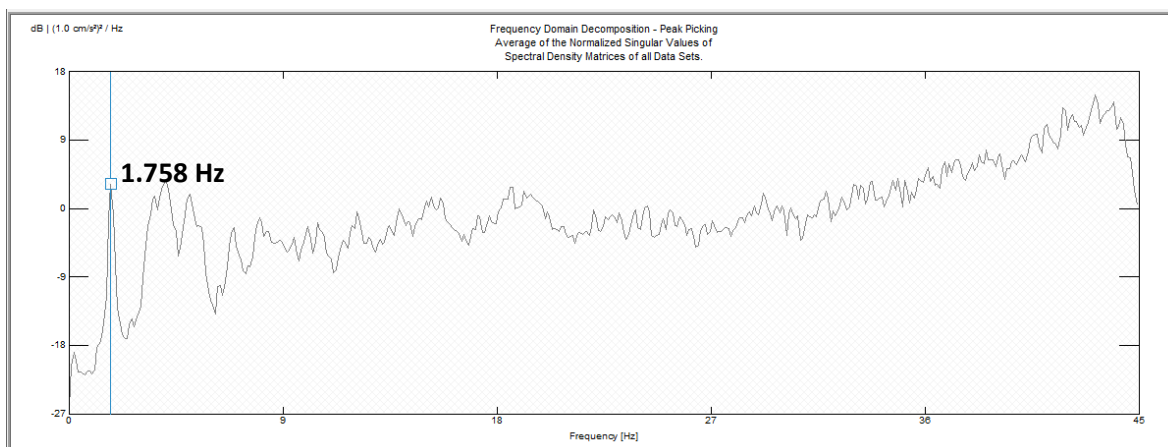


Figura 75 Torre de Templo de Capuchinas, $f = 1.758$ Hz.

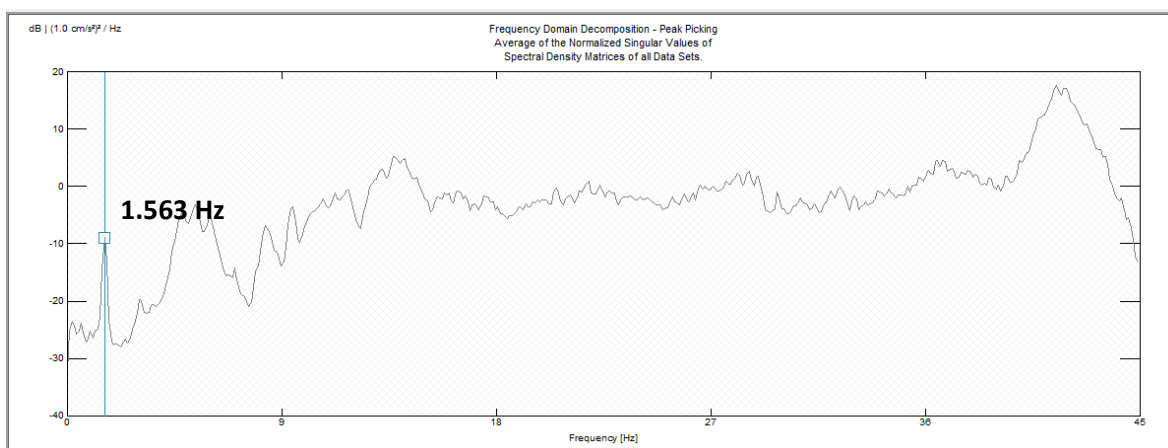


Figura 76 Torre de Templo de las Monjas, $f = 1.563$ Hz.

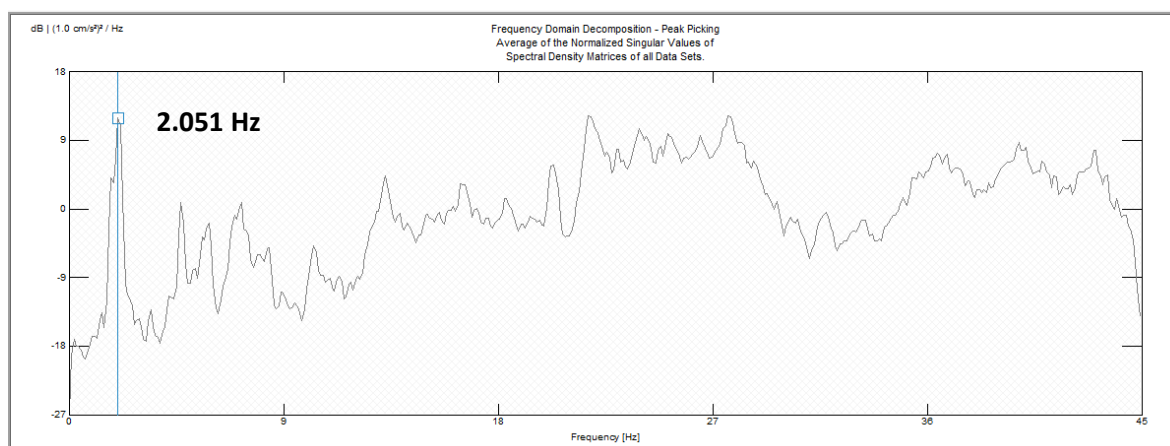


Figura 77 Torre de Templo de San José, $f = 2.051$ Hz.

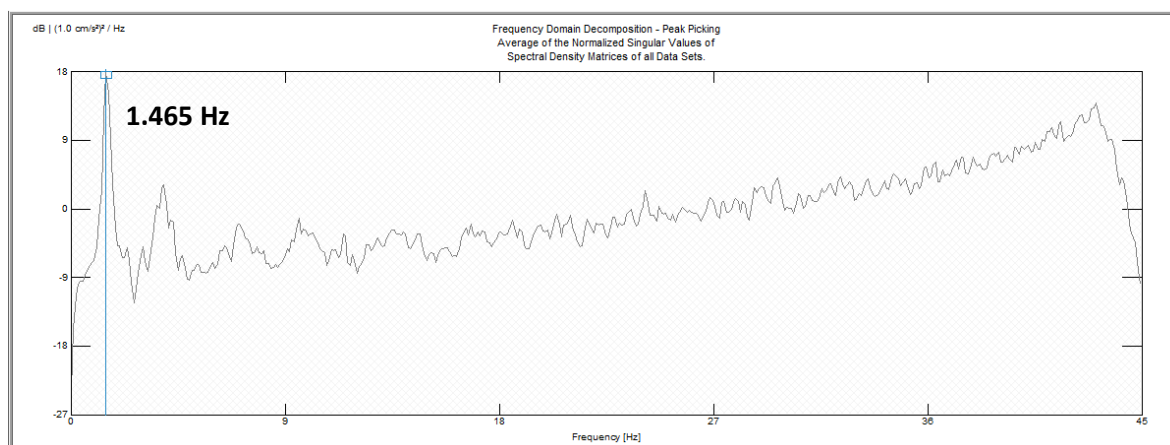


Figura 78 Torre de Iglesia de San Agustín, $f = 1.465$ Hz.

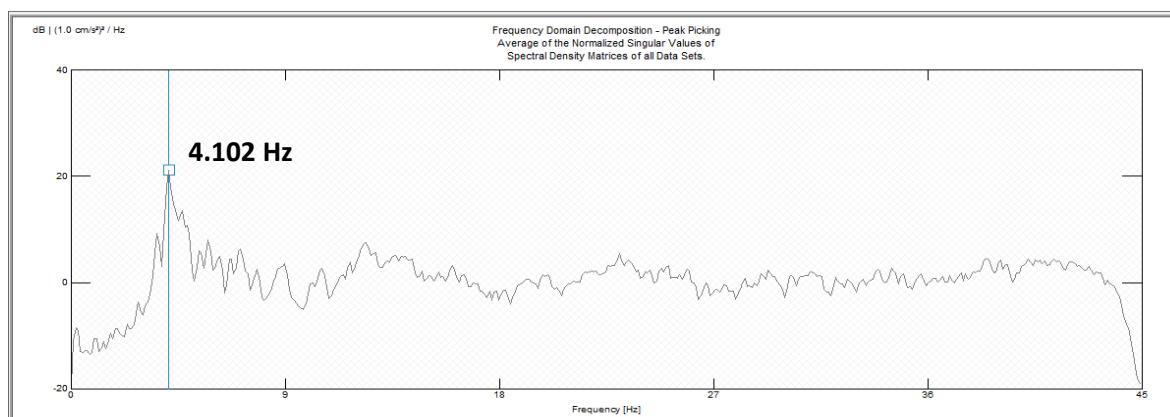


Figura 79 Nave del Templo del Carmen, $f = 4.102$ Hz.

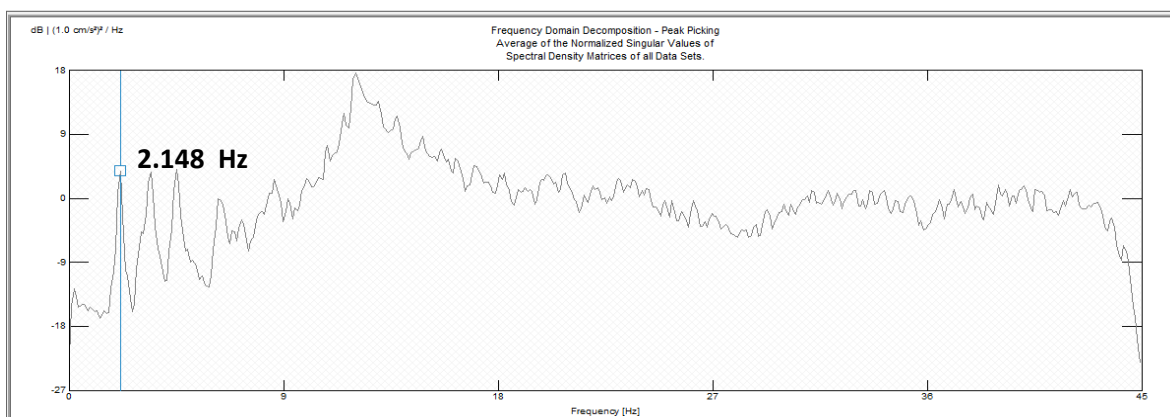


Figura 80 Nave del Templo de las Rosas, $f = 2.148$ Hz.

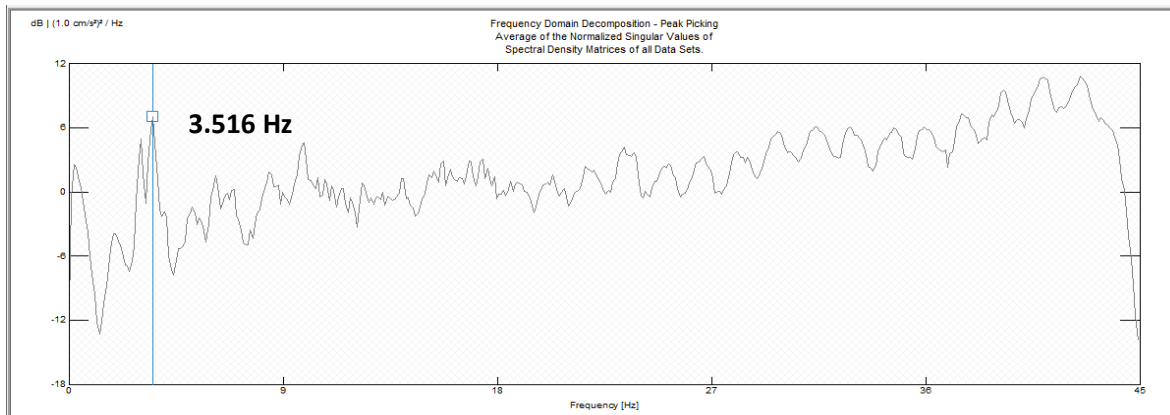


Figura 81 Nave de la Biblioteca Pública, $f = 3.516$ Hz.

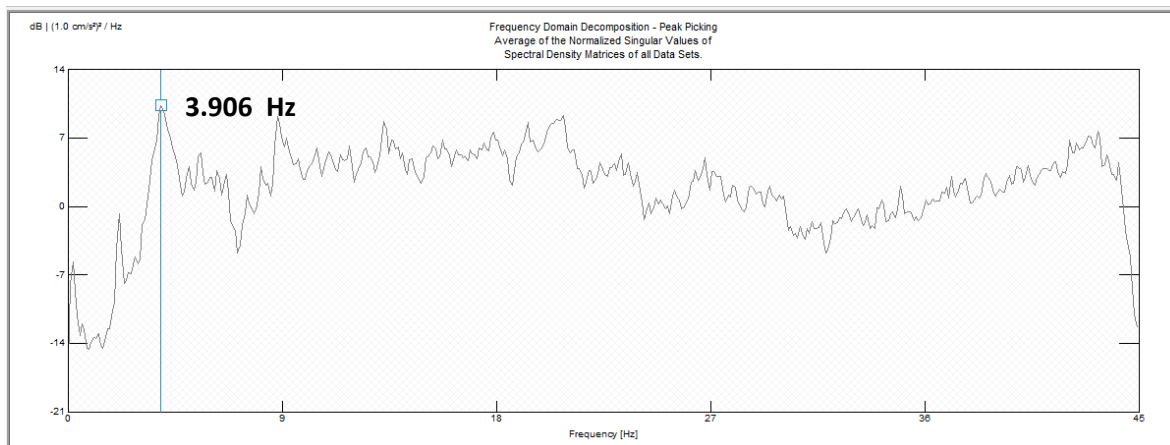


Figura 82 Nave del Templo San Diego, $f = 3.906$ Hz.

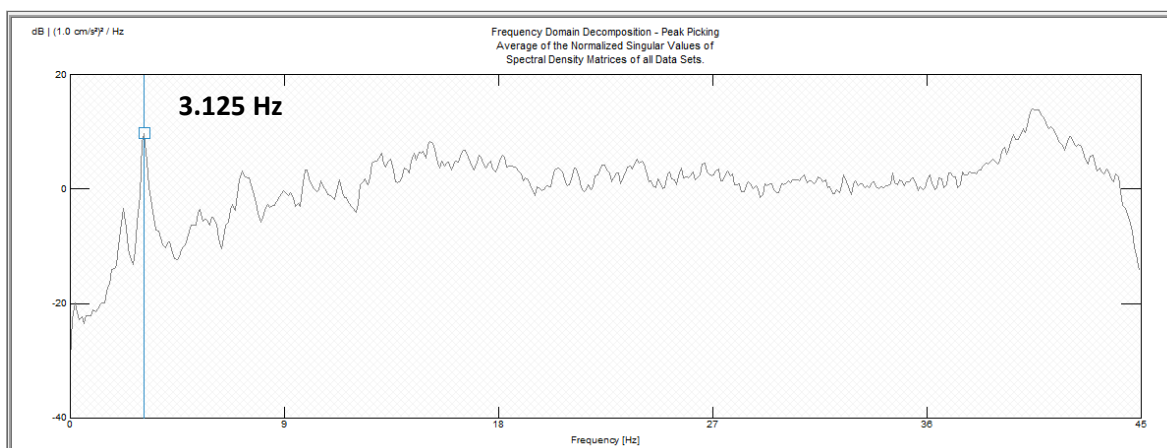


Figura 83 Nave del Templo de la Merced, $f = 3.125$ Hz.

Tabla 4 Alturas y propiedades dinámicas medidas en torres

Edificio	Alturas de Torres (m)	Período Fundamental en Torres (Seg.)	Amortiguamiento en Torres (%)
Templo de las Rosas	-	-	-
Catedral	62	0.731528895	4.095
San Agustín	40.92	0.682593857	4.679
San José	39.66	0.48756704	2.992
Capuchinas	37.75	0.568828214	3.562
Templo de la Merced	31.33	0.445235975	2.804
San Diego	28	0.465549348	0
Templo de las Monjas	27.34	0.639795266	2.976
Templo del Carmen	27.33	0.409668169	0
Biblioteca Pública	25.39	0.137873983	0

**Tabla 5 Alturas y propiedades dinámicas medidas en naves**

Edificio	Alturas de Naves (m)	Período Fundamental en Naves (Seg.)	Amortiguamiento en Naves (%)
Templo de las Rosas	15.7	0.465549348	1.056
Catedral	19.05	0.3638	2.688
San Agustín	17.35	0.42662116	2.771
San José	19.26	0.292568754	2.251
Capuchinas	-	-	-
Templo de la Merced	11.69	0.32	2.058
San Diego	13.11	0.255167134	4.918
Templo de las Monjas	13.58	0.330360093	3.572
Templo del Carmen	15.96	0.24378352	1.872
Biblioteca Pública	14.86	0.283366393	4.652

Los resultados derivados del procesamiento anterior (ver tablas 4 y 5), presentan un rango de variación del período fundamental que va de 0.13 a 0.73 segundos, así como del 1.026 al 6.291 por ciento del amortiguamiento crítico; no se debe de perder de vista que los valores de amortiguamiento reportados son para niveles bajos de vibración, y han sido obtenidos utilizando la técnica EFDD o de descomposición mejorada en el dominio del tiempo (svibs, 2011).



Las alturas registradas tanto para torres como para naves presentan una variación de la altura que va de 25 a 62 metros y de 11 a 19 metros, respectivamente. Presentando una altura promedio de 35 metros aproximadamente para torres y 15 metros aproximadamente para las naves. Es importante resaltar las variaciones que hay entre estos parámetros, tanto para las propiedades dinámicas como para las alturas de las edificaciones en estudio, con el fin de poder realizar un análisis en el cual se correlacionen estos parámetros, en los capítulos siguientes se establecerá la metodología y el análisis para la correlación de estos parámetros.



5.- SIMULACIÓN DE MONTE CARLO

Este método fue llamado así por un principado de Mónaco por ser “la capital del juego de azar”, al tomar una ruleta como un generador simple de números aleatorios. El nombre y el desarrollo sistemático del método de Monte Carlo datan aproximadamente de 1944 con el desarrollo de la computadora.

Aunque el uso real del método de Monte Carlo como una forma de herramienta de investigación, proviene del trabajo de la bomba atómica durante la Segunda Guerra Mundial. Este trabajo involucraba la simulación directa de problemas probabilísticos de hidrodinámica concernientes a la difusión de neutrones aleatorios en material de fusión.

Alrededor de 1970, los desarrollos teóricos en complejidad computacional comienzan a proveer mayor precisión y relación para el empleo del método Monte Carlo. La teoría identifica una clase de problemas para los cuales el tiempo necesario para evaluar la solución exacta al problema crece con la clase.

Los orígenes de este método están ligados al trabajo desarrollado por Stanislaw Ulam y John von Neumann (E. J. Konopinski, Marvin C., 1946) a finales de los años 40 en el laboratorio de Los Alamos, cuando investigaban el movimiento aleatorio de los neutrones. En años posteriores, la simulación de Monte Carlo se ha estado aplicando a una infinidad de ámbitos como alternativa a los modelos matemáticos exactos o incluso como único medio de estimar soluciones para problemas complejos. Así, en realidad es posible encontrar modelos que hacen uso de simulación Monte Carlo en las áreas informática, empresarial, económica, industrial e incluso social. En otras palabras, la simulación Monte Carlo está presente en todos aquellos ámbitos en los que el comportamiento aleatorio o probabilístico desempeña un papel fundamental; precisamente el nombre de



Monte Carlo proviene de la famosa ciudad de Mónaco, donde abundan los casinos de juego y donde el azar, la probabilidad y el comportamiento aleatorio conforman todo un estilo de vida.

Dado lo anterior el Método de Monte Carlo es una serie de procedimientos que analizan distribuciones de variables aleatorias usando la simulación de números aleatorios.

El objeto de la simulación es duplicar las características y comportamientos propios de un sistema real; recrear una representación más aproximada del sistema dependerá principalmente de la cantidad y calidad de los datos con los que la simulación sea “alimentada”.

Además la simulación de Monte Carlo permite generar números aleatorios de acuerdo a distribuciones de probabilidad conocidas o supuestas. Este tipo de simulación tiene la ventaja de poderse implementar fácilmente en un programa de cómputo, sin embargo, ésta puede estar limitada por la capacidad de cómputo y el tiempo de procesamiento.

Lo anterior definirá el modelo matemático con el cual se tendrá que trabajar para la simulación, tomando en cuenta parámetros característicos que definan la tendencia u ocurrencia de los datos como lo son la media y desviación estándar de la muestra que se estudiará.

El planteamiento del problema general se presenta de la siguiente manera:

1. Generar muestreos de una variable aleatoria “X” ($\{x^{(n)}\}$) dada su densidad de probabilidad $P(x)$.
2. Estimar el valor esperado de una función $q(x)$ bajo una densidad de probabilidad $P(x)$: $q(x) = \int P(x)dx$



Aun contando con la calidad y cantidad de datos en una muestra que se está analizando, es conveniente recordar que los resultados de la simulación son de orden aleatorio y por tanto serán diferentes unos respecto de otros, los datos resultantes son aproximaciones del caso real, como se mencionó en párrafos anteriores.

Debido a que la tipología de las iglesias por analizar se considerará la distribución de los valores y variables que participan en su comportamiento dinámico, con el propósito de considerar todas las combinaciones posibles y así conocer la tendencia de los resultados.

En este estudio se recurrió a un programa de cómputo orientado al análisis de riesgo y pronóstico a través de gráficos para ayudar en la toma de decisiones, cuya función, es generar números aleatorios bajo diferentes criterios y puede operar en conjunto con las hojas de cálculo de Excel. El programa además arroja los resultados agrupados en gráficas y numéricamente, además se configuró para correr diez mil escenarios para cada propuesta (@RISK, 2012).

Los resultados producto de las simulaciones en el software empleado tanto de los periodos como para amortiguamientos se pueden apreciar en las figuras 84 a 89. Pero para su análisis se decidió realizar un ajuste de una función utilizando por practicidad el Excel (figura 90 a 95), así como para la verificación de las funciones resultantes del ajuste en las Simulaciones de Monte Carlo (MC), ver tablas 6 a 8.

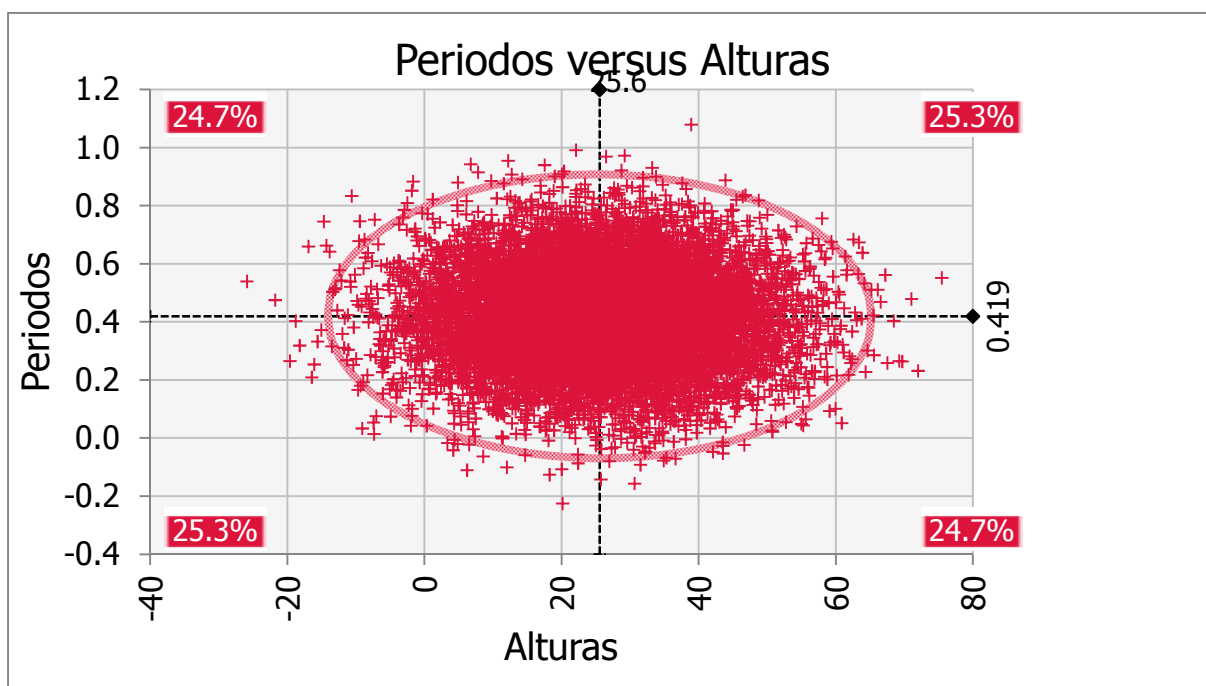


Figura 84 Resultado de la Simulación para los periodos de torres y naves (10 mil iteraciones).

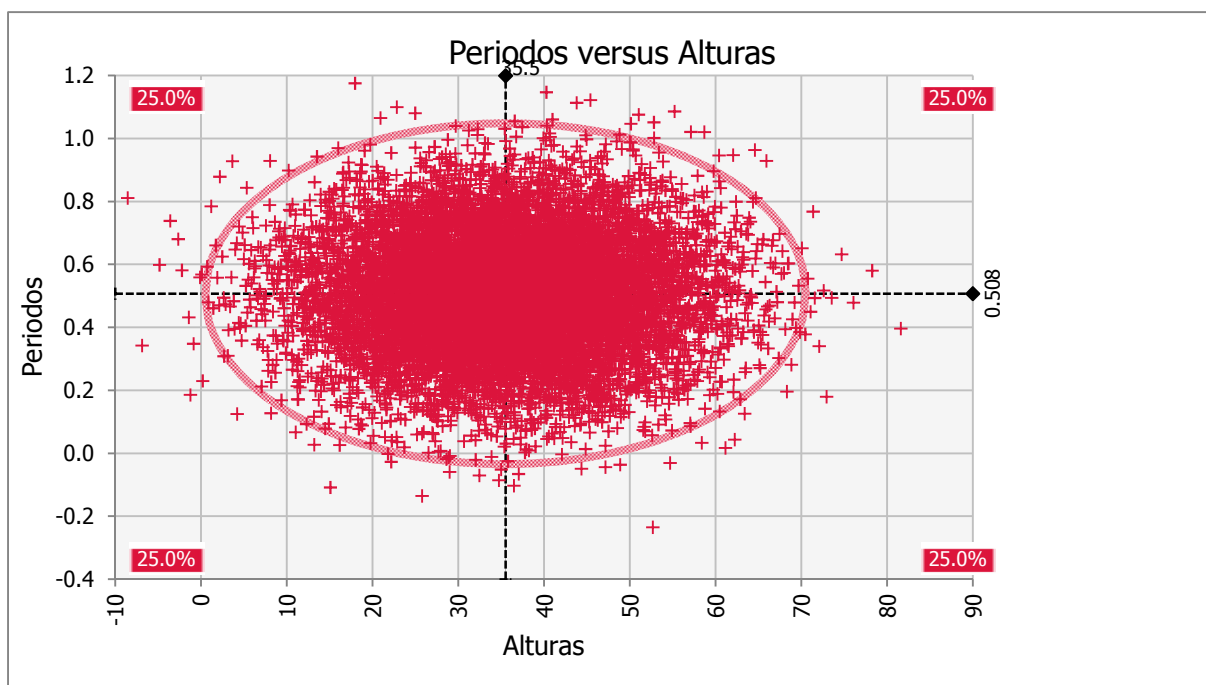


Figura 85 Resultado de la Simulación para los periodos de torres (10 mil iteraciones).

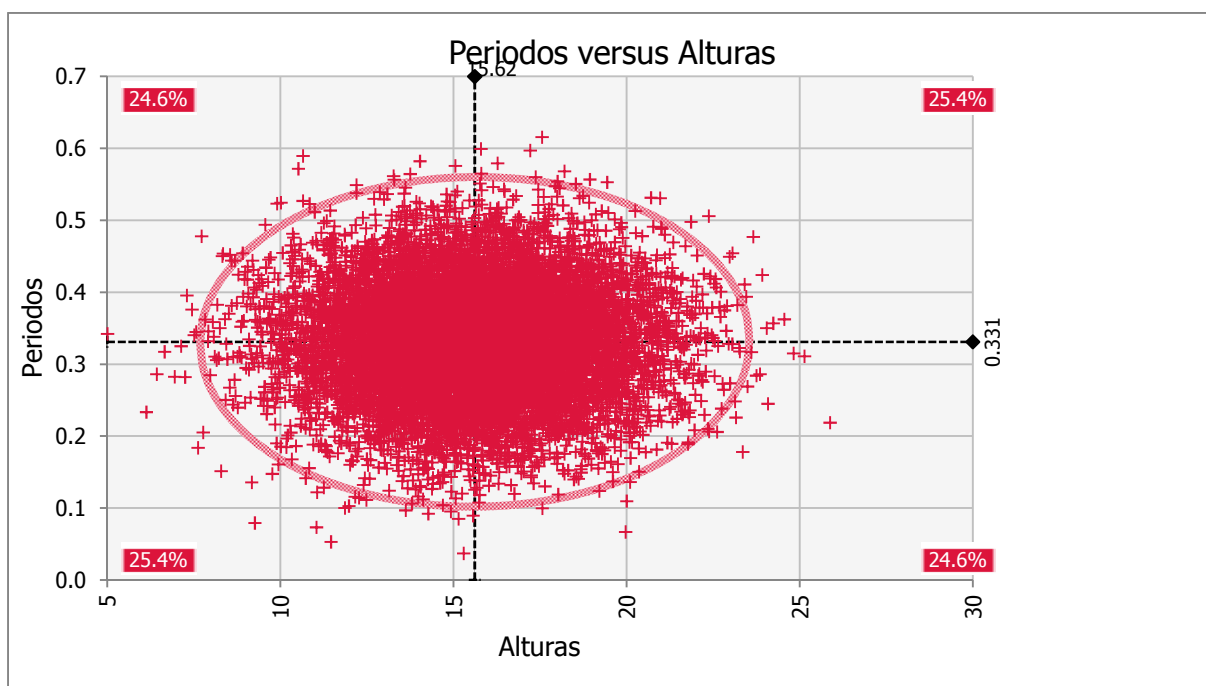


Figura 86 Resultado de la Simulación para los periodos de naves (10 mil iteraciones).

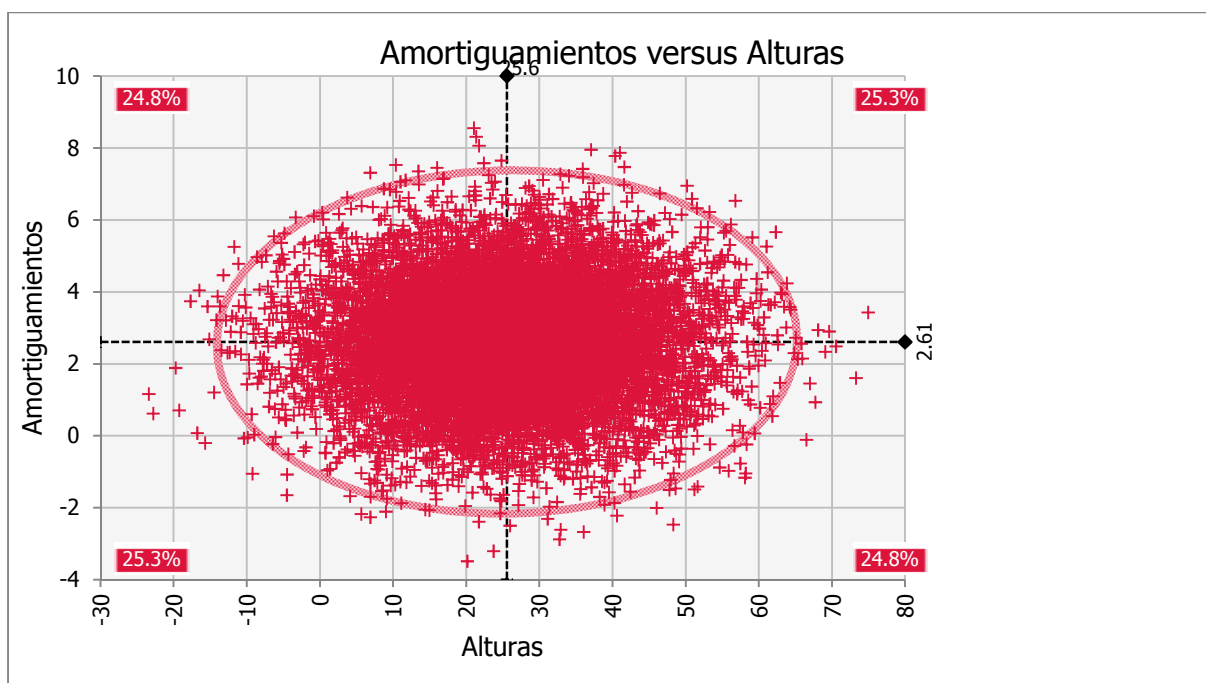


Figura 87 Resultado de la Simulación para los amortiguamientos de torres y naves (10 mil iteraciones).

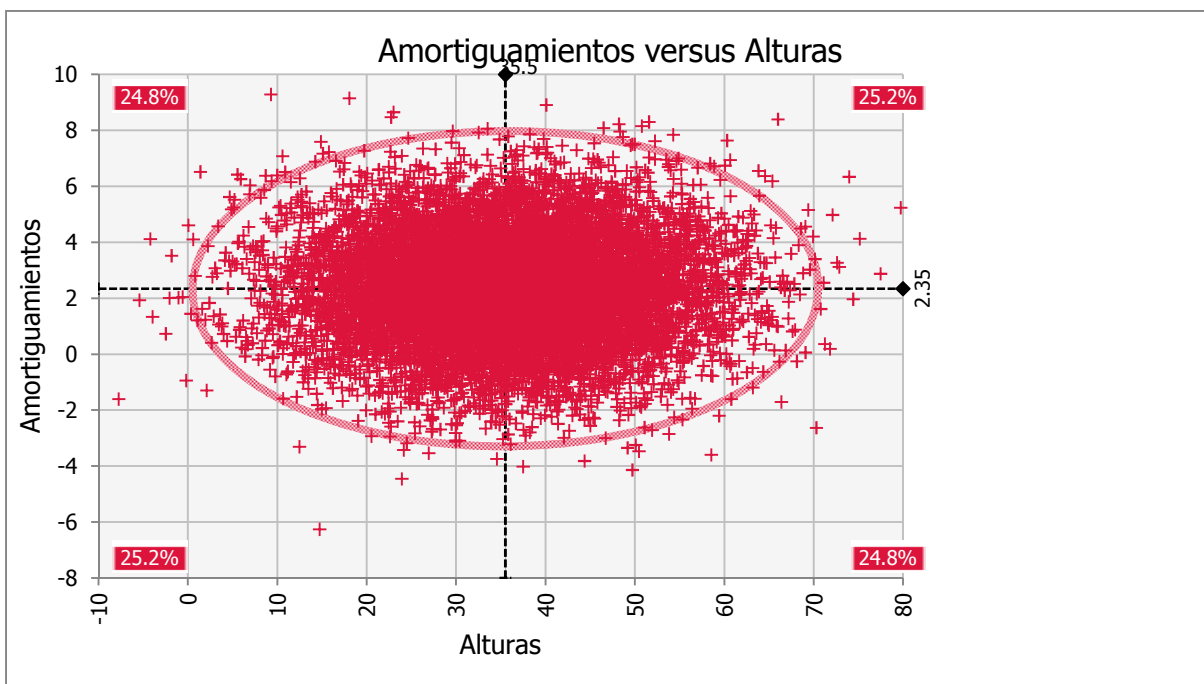


Figura 88 Resultado de la Simulación para los amortiguamientos de torres (10 mil iteraciones).

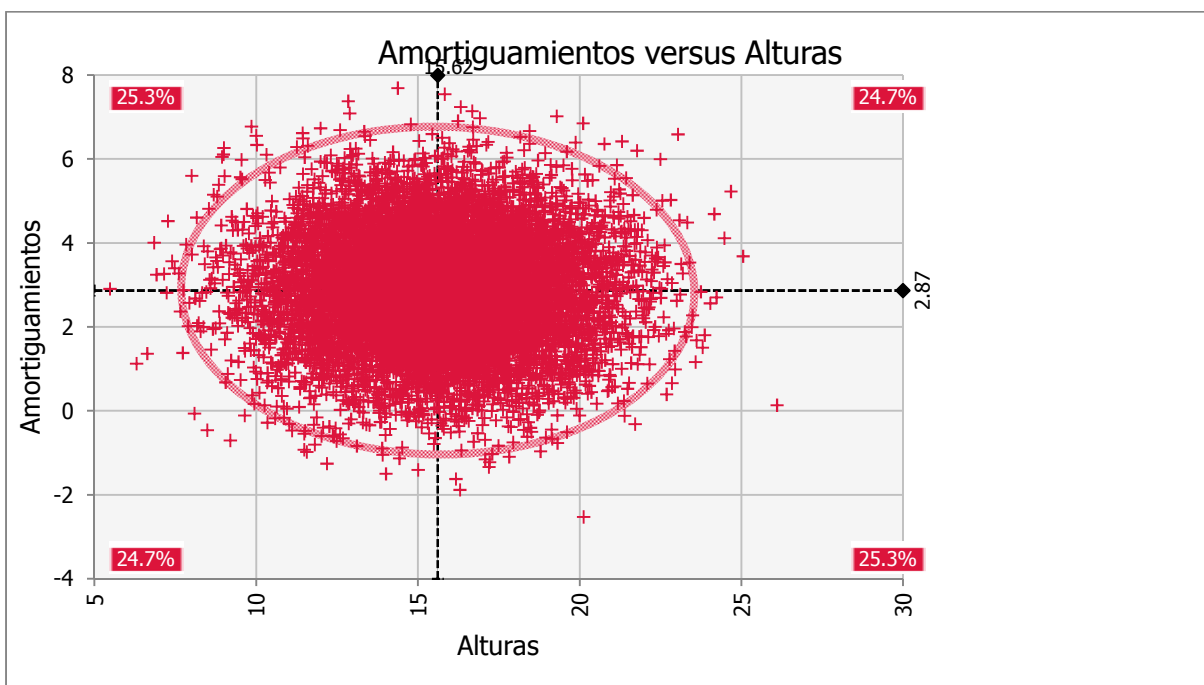


Figura 89 Resultado de la Simulación para los amortiguamientos de naves (10 mil iteraciones).

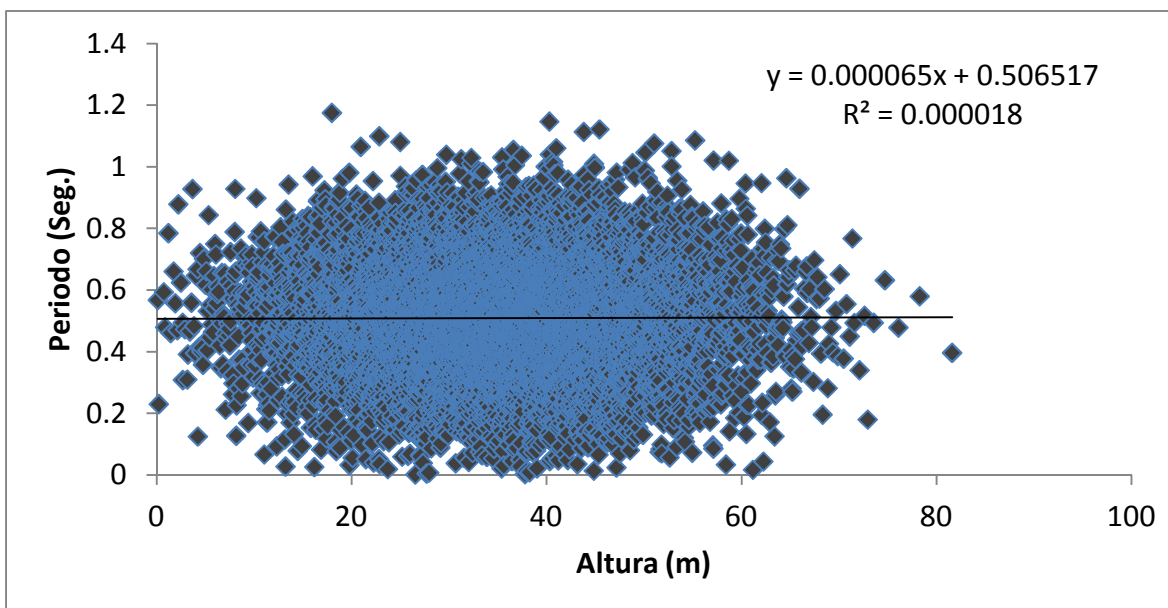


Figura 90 Relación del periodo y altura en torres para la simulación Monte Carlo.

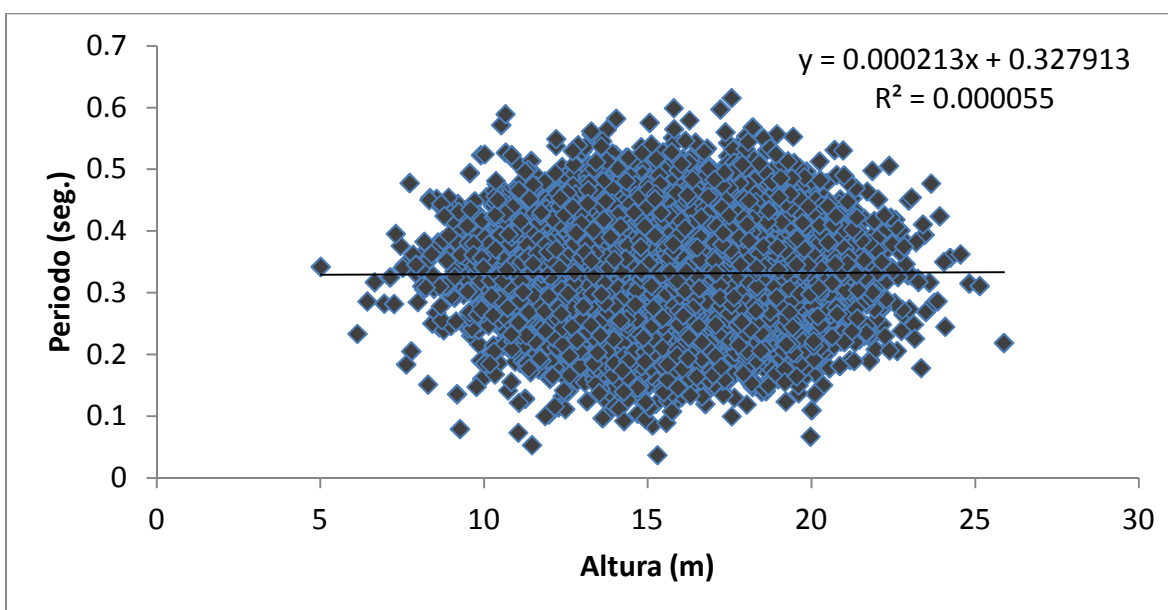


Figura 91 Relación del periodo y altura en naves para la simulación Monte Carlo.

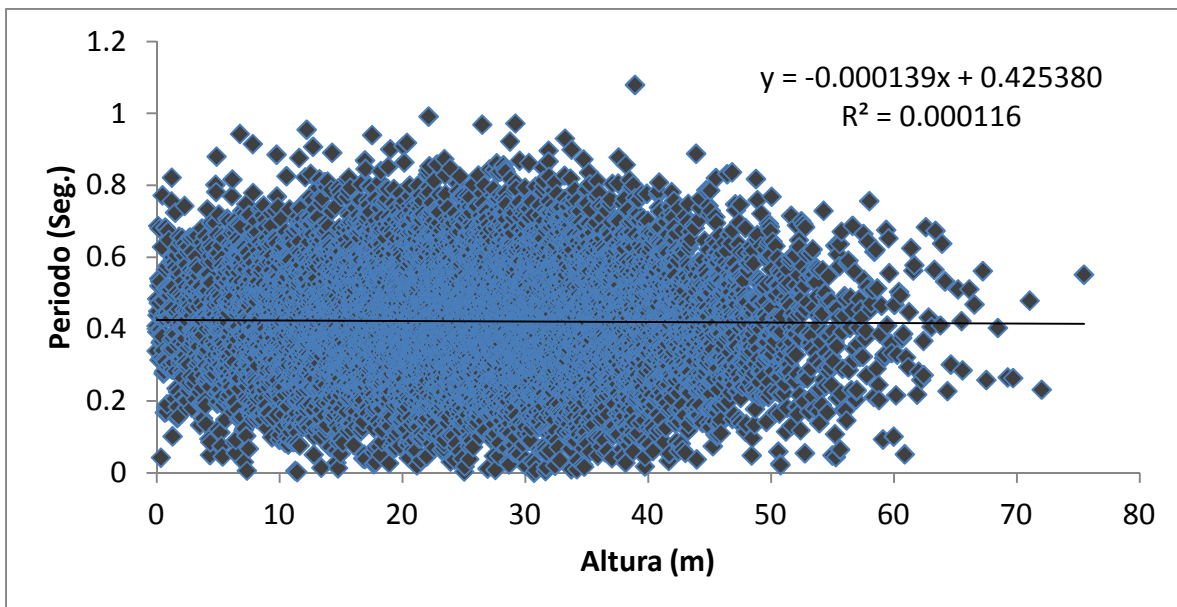


Figura 92 Relación del periodo y altura en torres y naves para la simulación Monte Carlo.

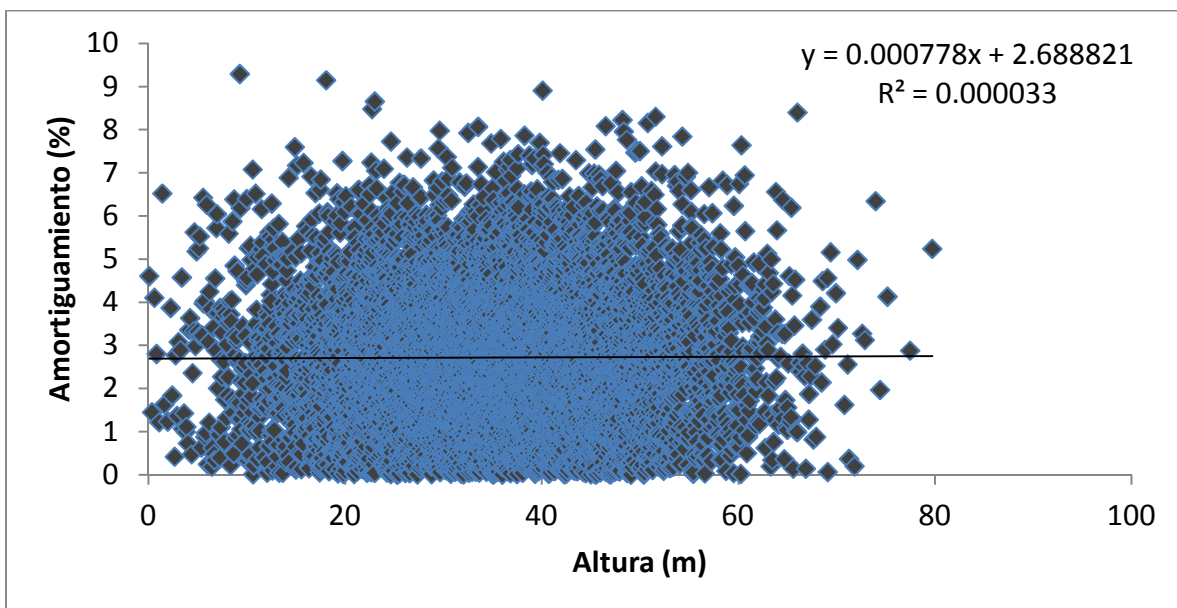


Figura 93 Relación del amortiguamiento y altura en torres para la simulación Monte Carlo.

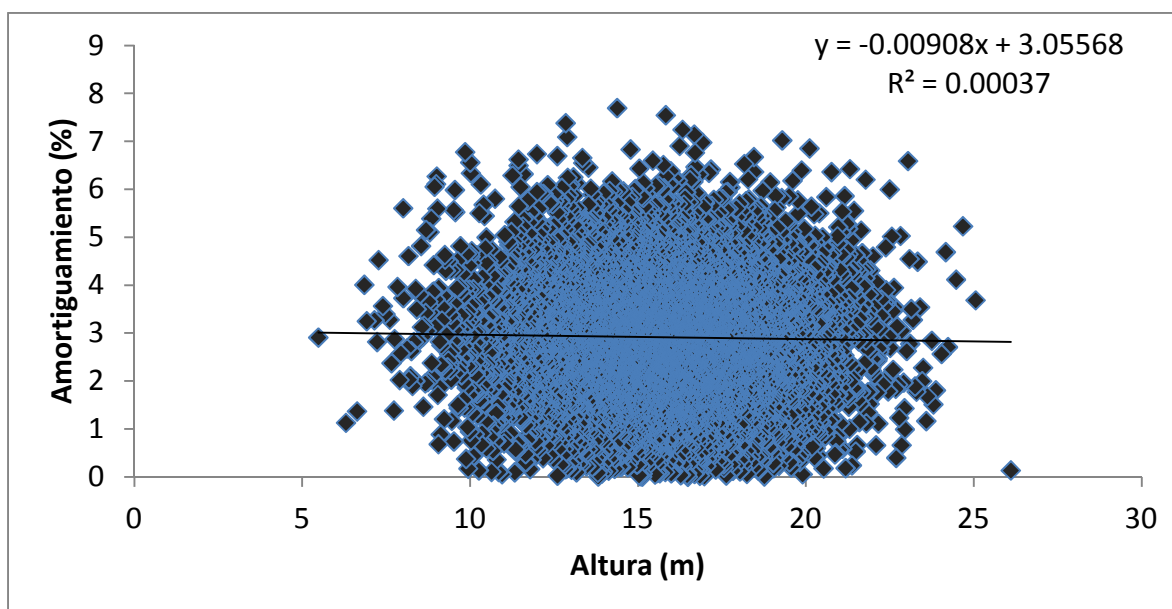


Figura 94 Relación del amortiguamiento y altura en naves para la simulación Monte Carlo.

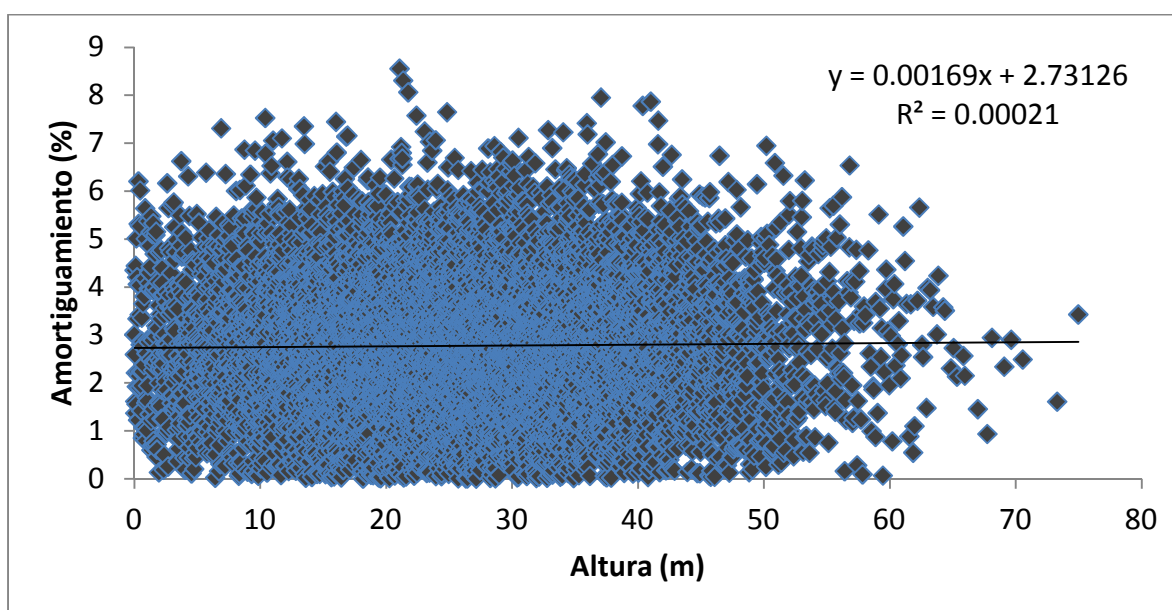


Figura 95 Relación del amortiguamiento y altura en torres y naves para la simulación Monte Carlo.



Los valores calculados en la verificación del método de Monte Carlo tienen un rango de variación muy pequeño, tanto en los datos de los periodos fundamentales como en los amortiguamientos, esto se debe a la cantidad considerable de datos que se simularon y a su vez la concentración de estos producto de los parámetros probabilísticos para generar a esta.

La verificación de los datos se plasma en el capítulo 6. A manera de resumen se presentan las tablas 6 a 8 con las ecuaciones que resultaron del ajuste en la simulación de Monte Carlo.

Tabla 6 Ecuaciones para obtener las propiedades dinámicas en torres

Estimación	Ecuación	R ²
Periodo	$0.000065 \cdot x + 0.506517$	0.000018
Amortiguamiento	$0.00078 \cdot x + 2.68882$	0.00003

Tabla 7 Ecuaciones para obtener las propiedades dinámicas en naves

Estimación	Ecuación	R ²
Periodo	$0.000213 \cdot x + 0.3227913$	0.000055
Amortiguamiento	$-0.00908 \cdot x + 3.05568$	0.00037



Tabla 8 Ecuaciones para obtener las propiedades dinámicas en torres y naves

Estimación	Ecuación	R ²
Periodo	- 0.00139*x + 0.42538	0.000116
Amortiguamiento	0.00169*x + 2.73126	0.00021

En las tablas anteriores R² es el coeficiente de determinación.

No hay que perder de vista que los resultados de las simulaciones son de orden aleatorio, como se ha mencionado en este capítulo la certeza y confiabilidad de los resultados dependerá de la calidad y cantidad de la muestra que se uso para generar la semilla que alimenta el modelo.



6.- CARACTERIZACIÓN DINÁMICA

El procedimiento general empleado consistió en relacionar la altura contra el periodo fundamental y amortiguamiento para cada edificio, con la finalidad de generar una nube de puntos que permitiera el *ajuste de funciones representativas* por medio de mínimos cuadrados. El criterio seguido para conocer la bondad del ajuste fue el de la desviación estándar residual, que representa la cantidad de dispersión de los datos que no queda explicada por la ecuación ajustada.

De lo comentado en capítulos anteriores, es evidente la asimetría que existe entre los elementos principales, como lo son las torres y las naves de estos edificios en particular; partiendo de esta característica tan marcada, se puede aceptar que de manera general las estructuras históricas tienden a un comportamiento por unidades individuales, con un desempeño sísmico que es autónomo del resto del edificio conocidas como macroelementos (Doglioni, 1994), resulta notorio entonces que éstas últimas tendrán propiedades dinámicas propias e independientes tornándose por tanto necesaria para los fines de la presente investigación, una subdivisión de los principales componentes estructurales de la edificación (figura 96)

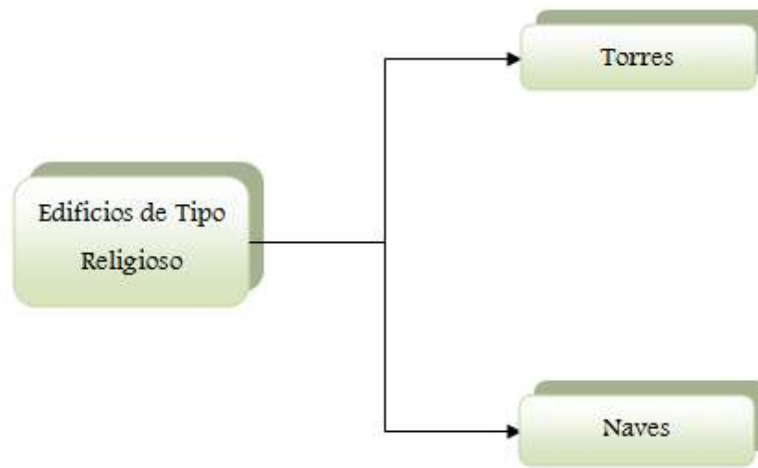


Figura 96 Subdivisión para el Análisis de la Edificaciones.

a) Periodo Fundamental y Amortiguamiento para Torres

En principio se optó por realizar ajustes de tipo lineal con la finalidad de que la ecuación resultante contenga el menor número de términos, de cara a una ecuación de aplicación simple (figura 97 y 98). Esta situación resultó favorable de manera general para los casos que involucran el periodo de vibración. En la tabla 9 se presenta la desviación estándar y el coeficiente de determinación para el caso de torres.

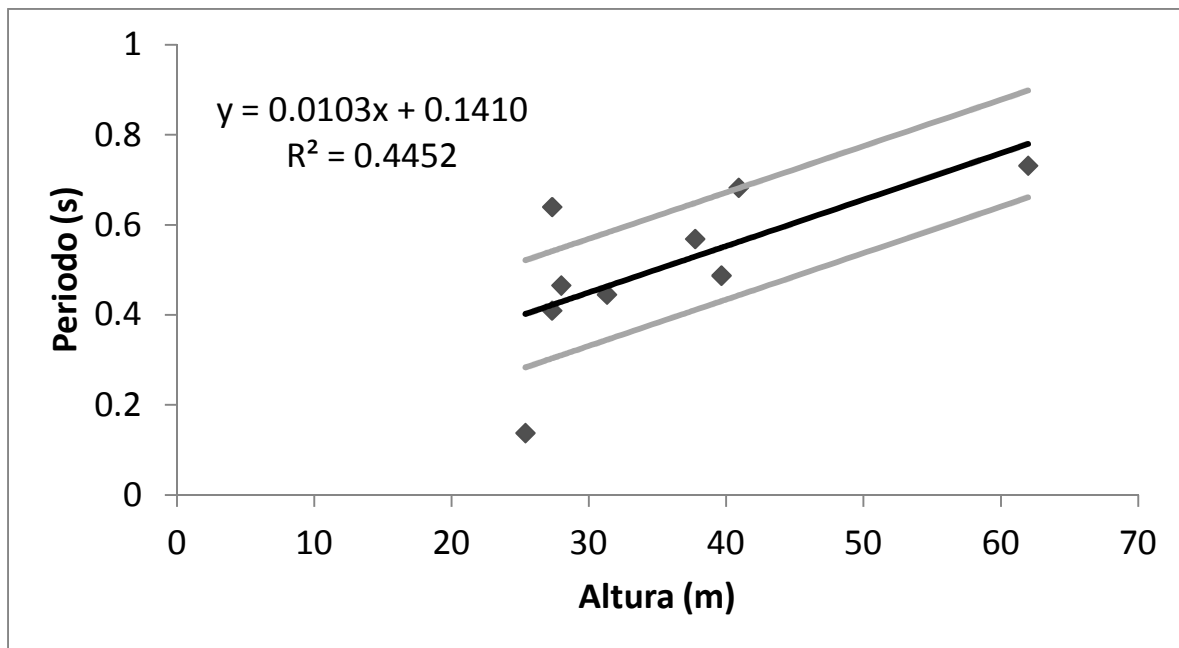


Figura 97 Relación del periodo y la altura $\pm \sigma$ en Torres

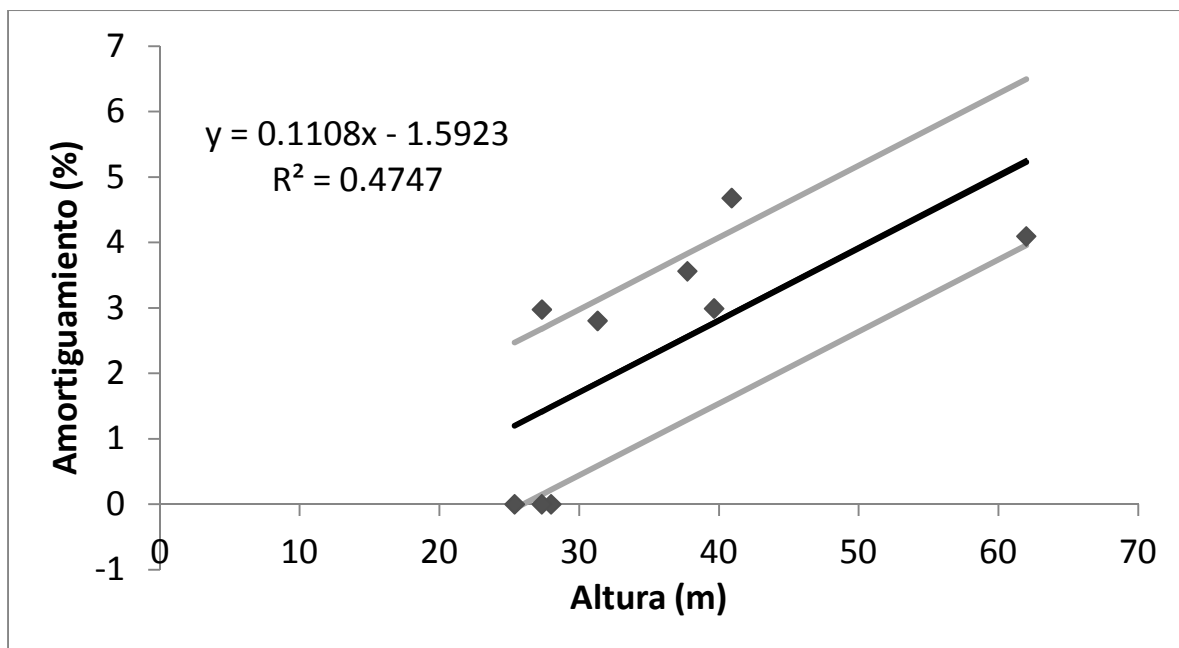


Figura 98 Relación del amortiguamiento y la altura $\pm \sigma$ en Torres



Tabla 9 Ecuaciones para la obtención de las propiedades dinámicas en torres, con su coeficiente de determinación y su desviación estándar

Estimación	Ecuación	R^2	Desviación Estándar
Periodo	$0.010 \cdot x + 0.141$	0.445	0.115280886
Amortiguamiento	$0.110 \cdot x - 1.592$	0.474	1.268089751

b) Periodo Fundamental y Amortiguamiento para Naves

Debido a que las alturas en estas son pequeñas comparadas con las torres; es de esperar, que el periodo fundamental asociado a las naves tendrá valores pequeños. En cuanto al amortiguamiento serán muy variados debido a que cada una de ellas presenta características particulares en su configuración estructural (figura 99, 100 y tabla 10).

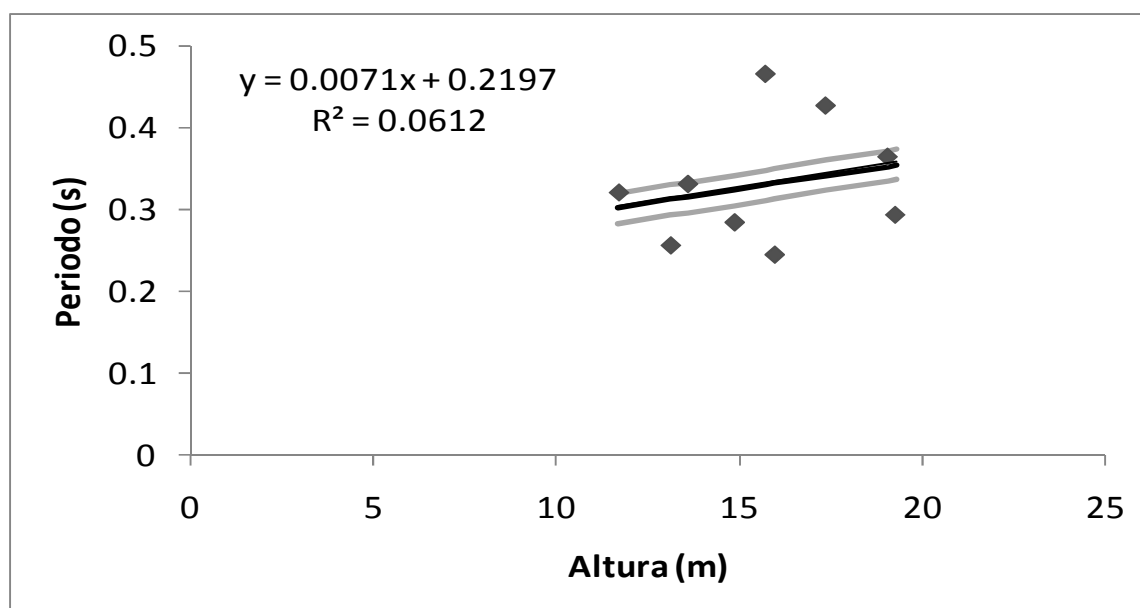


Figura 99 Relación del periodo y la altura $\pm \sigma$ en Naves

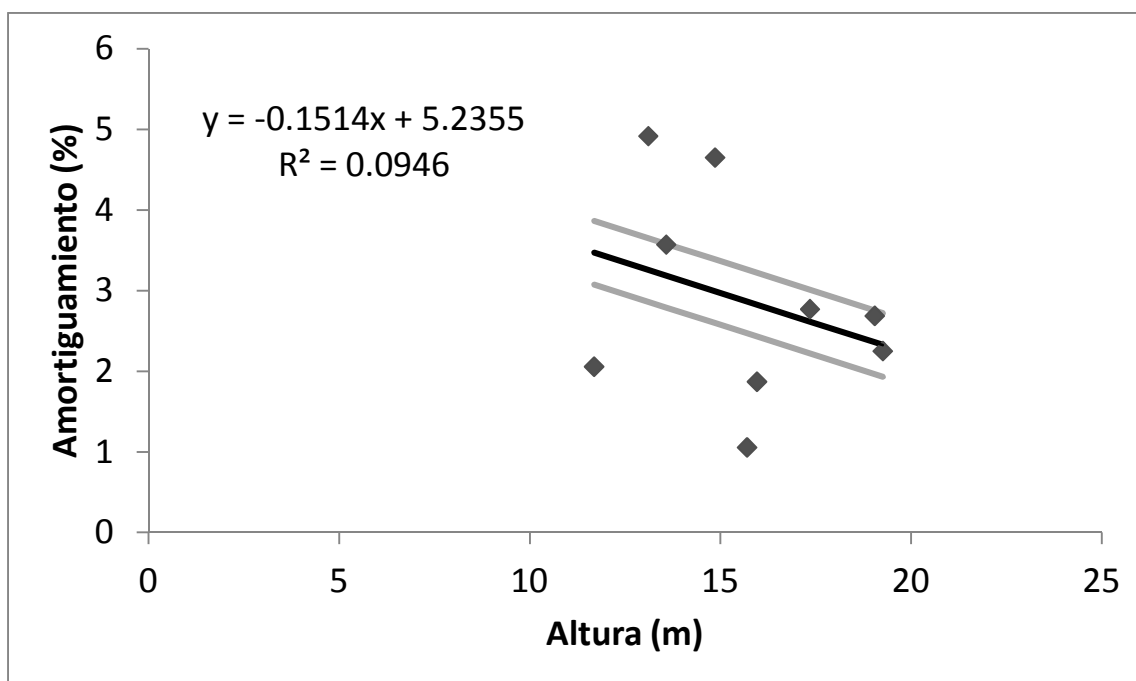


Figura 100 Relación del amortiguamiento y la altura $\pm \sigma$ en Naves

Tabla 10 Ecuaciones para la obtención de las propiedades dinámicas en naves, con su coeficiente de determinación y su desviación estándar

Estimación	Ecuación	R ²	Desviación Estándar
Periodo	0.007*x + 0.219	0.061	0.018289561
Amortiguamiento	- 0.151*x + 5.235	0.094	0.394531951



c) Periodo Fundamental y Amortiguamiento para Torres y Naves

Con la finalidad de poder comparar la bondad de las expresiones empíricas obtenidas en las subdivisiones, se presenta el ajuste para la totalidad del conjunto de edificios estudiados (figura 101, 102 y tabla 11).

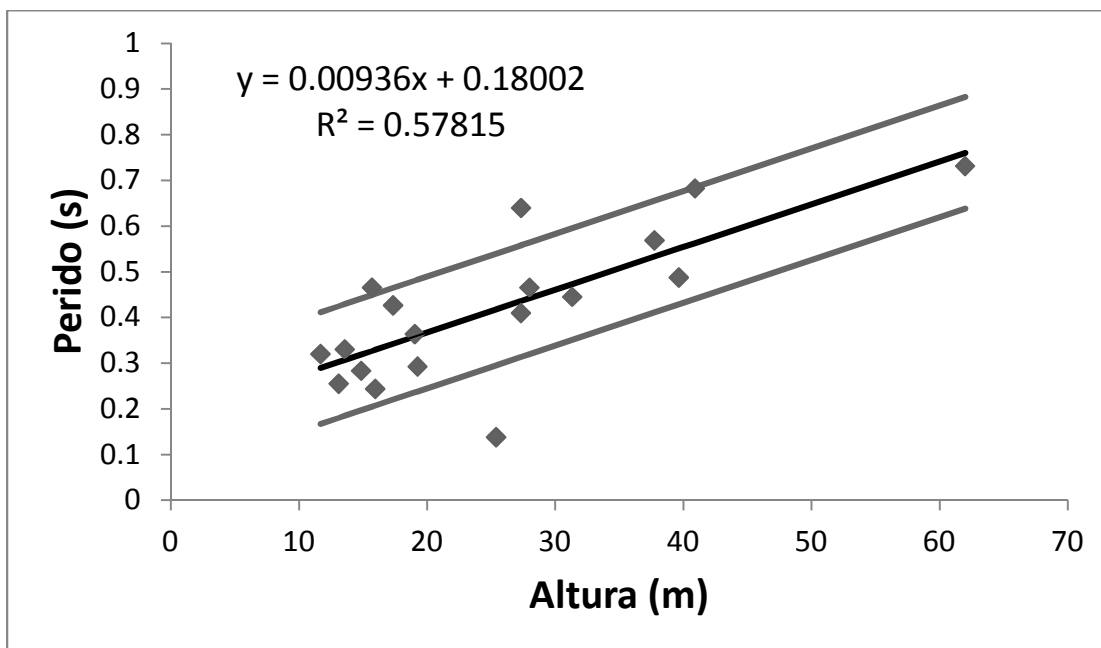


Figura 101 Relación del periodo y la altura $\pm \sigma$ en Torres y Naves

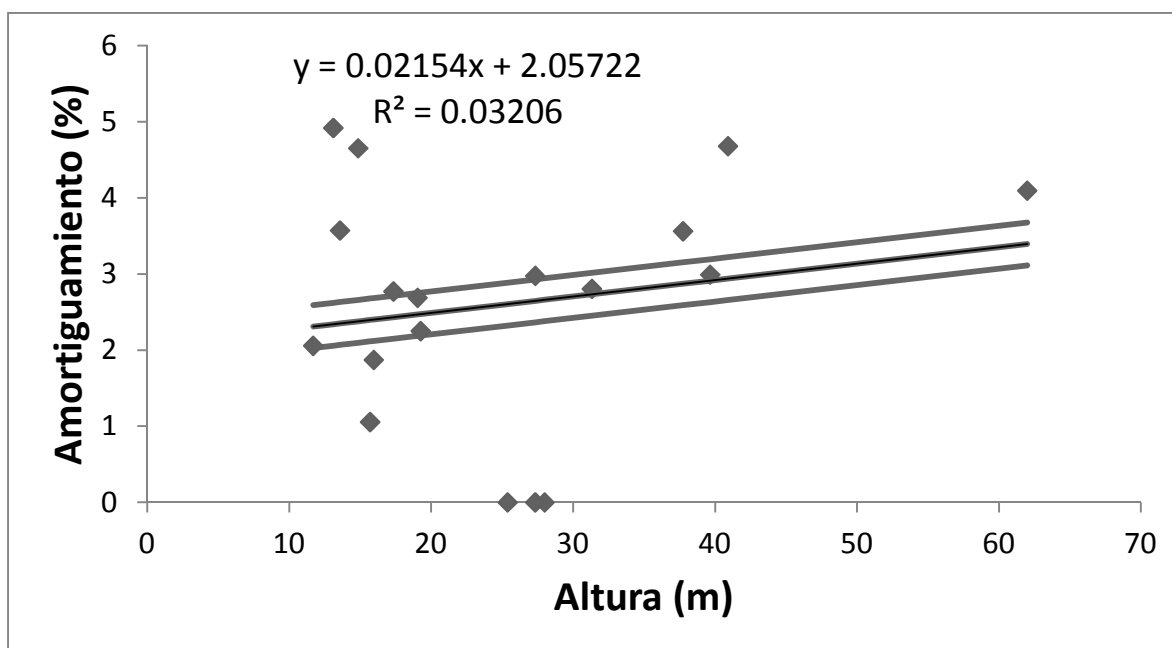


Figura 102 Relación del amortiguamiento y la altura $\pm \sigma$ en Torres y Naves

Tabla 11 Ecuaciones para la obtención de las propiedades dinámicas en torres y naves, con su coeficiente de determinación y su desviación estándar

Estimación	Ecuación	R ²	Desviación Estándar
Periodo	0.00936*x + 0.18002	0.57815	0.12227208
Amortiguamiento	0.02154*x + 2.05722	0.03206	0.281382544



d) Verificación de las Formulas Empíricas

La aplicación directa de las formulas obtenidas para los ajustes de las propiedades dinámicas experimentalmente, permite finalmente realizar una comparativa entre los datos medidos y los datos calculados con las formulas empíricas obtenidas de cara a la verificación de su confiabilidad (tabla 12 a 14).

Tabla 12 Propiedades dinámicas medidas y calculadas en torres

Edificio	Alturas de Torres (m)	Periodo Fundamental (Seg.)	Amortiguamiento (%)	Periodo Calculado (Seg.)	Amortiguamiento Calculado (%)
Catedral	62	0.73153	4.095	0.761	5.228
San Agustín	40.92	0.68259	4.679	0.5502	2.9092
San José	39.66	0.48757	2.992	0.5376	2.7706
Capuchinas	37.75	0.56883	3.562	0.5185	2.5605
Templo de la Merced	31.33	0.44524	2.804	0.4543	1.8543
San Diego	28	0.46555	0	0.421	1.488
Templo de las Monjas	27.34	0.63980	2.976	0.4144	1.4154
Templo del Carmen	27.33	0.40967	0	0.4143	1.4143
Biblioteca Pública	25.39	0.13787	0	0.3949	1.2009



Tabla 13 Propiedades dinámicas medidas y calculadas en naves

Edificio	Alturas de Naves (m)	Periodo Fundamental (Seg.)	Amortiguamiento (%)	Periodo Calculado (Seg.)	Amortiguamiento Calculado (%)
San José	19.26	0.29257	2.251	0.35382	2.32674
Catedral	19.05	0.36380	2.688	0.35235	2.35845
San Agustín	17.35	0.42662	2.771	0.34045	2.61515
Templo del Carmen	15.96	0.24378	1.872	0.33072	2.82504
Templo de las Rosas	15.7	0.46555	1.056	0.3289	2.8643
Biblioteca Pública	14.86	0.28337	4.652	0.32302	2.99114
Templo de las Monjas	13.58	0.33036	3.572	0.31406	3.18442
San Diego	13.11	0.25517	4.918	0.31077	3.25539
Templo de la Merced	11.69	0.32000	2.058	0.30083	3.46981



Tabla 14 Propiedades dinámicas medidas y calculadas en torres y naves

Edificio	Alturas (m)	Periodo Fundamental (Seg.)	Amortiguamiento (%)	Periodo Calculado (Seg.)	Amortiguamiento Calculado (%)
Catedral	62	0.73153	4.095	0.76034	3.39270
San Agustín	40.92	0.68259	4.679	0.56303	2.93864
San José	39.66	0.48757	2.992	0.55124	2.91150
Capuchinas	37.75	0.56883	3.562	0.53336	2.87036
Templo de la Merced	31.33	0.44524	2.804	0.47327	2.73207
San Diego	28	0.46555	-	0.44210	2.66034
Templo de las Monjas	27.34	0.63980	2.976	0.43592	2.64612
Templo del Carmen	27.33	0.40967	-	0.43583	2.64591
Biblioteca Pública	25.39	0.13787	-	0.41767	2.60412
San José	19.26	0.29257	2.251	0.36029	2.47208
Catedral	19.05	0.36380	2.688	0.35833	2.46756
San Agustín	17.35	0.42662	2.771	0.34242	2.43094
Templo del Carmen	15.96	0.24378	1.872	0.32941	2.40100
Templo de las Rosas	15.7	0.46555	1.056	0.32697	2.39540
Biblioteca Pública	14.86	0.28337	4.652	0.31911	2.37730
Templo de las Monjas	13.58	0.33036	3.572	0.30713	2.34973
San Diego	13.11	0.25517	4.918	0.30273	2.33961
Templo de la Merced	11.69	0.32	2.058	0.28944	2.30902



Siguiendo el criterio mencionado anteriormente, a continuación se presenta la comparativa tanto de los resultados producto del cálculo de las funciones ajustadas en la Simulación de Monte Carlo así como los resultados de los datos obtenidos del cálculo de la verificación de los datos de confiabilidad (tabla 15 a 17).



Tabla 15 Propiedades dinámicas medidas, calculadas y calculadas para MC en torres.

	Alturas de Torres (m)	Periodo Fundamental (Seg.)	Amortiguamiento (%)	Periodo Calculado (Seg.)	Amortiguamiento Calculado (%)	Periodo Calculado (MC) (Seg.)	Amortiguamiento Calculado (MC) (%)
Catedral	62	0.731528895	4.095	0.761	5.228	0.510547	2.73718
San Agustín	40.92	0.682593857	4.679	0.5502	2.9092	0.5091768	2.7207376
San José	39.66	0.48756704	2.992	0.5376	2.7706	0.5090949	2.7197548
Capuchinas	37.75	0.568828214	3.562	0.5185	2.5605	0.5089708	2.718265
Templo de la Merced	31.33	0.445235975	2.804	0.4543	1.8543	0.5085535	2.7132574
San Diego	28	0.465549348	-	0.421	1.488	0.508337	2.71066
Templo de las Monjas	27.34	0.639795266	2.976	0.4144	1.4154	0.5082941	2.7101452
Templo del Carmen	27.33	0.409668169	-	0.4143	1.4143	0.5082935	2.7101374
Biblioteca Pública	25.39	0.137873983	-	0.3949	1.2009	0.5081674	2.7086242



Tabla 16 Propiedades dinámicas medidas, calculadas y calculadas para MC en naves.

Edificio	Alturas de Naves (m)	Periodo Fundamental (Seg.)	Amortiguamiento (%)	Periodo Calculado (Seg.)	Amortiguamiento Calculado (%)	Periodo Calculado (MC) (Seg.)	Amortiguamiento Calculado (MC) (%)
San José	19.26	0.292568754	2.251	0.35382	2.32674	0.3268937	2.8807992
Catedral	19.05	0.3638	2.688	0.35235	2.35845	0.326849	2.882706
San Agustín	17.35	0.42662116	2.771	0.34045	2.61515	0.3264869	2.898142
Templo del Carmen	15.96	0.24378352	1.872	0.33072	2.82504	0.3261908	2.9107632
Templo de las Rosas	15.7	0.465549348	1.056	0.3289	2.8643	0.3261354	2.913124
Biblioteca Pública	14.86	0.283366393	4.652	0.32302	2.99114	0.3259565	2.9207512
Templo de las Monjas	13.58	0.330360093	3.572	0.31406	3.18442	0.3256838	2.9323736
San Diego	13.11	0.255167134	4.918	0.31077	3.25539	0.3255837	2.9366412
Templo de la Merced	11.69	0.32	2.058	0.30083	3.46981	0.3252813	2.9495348



Tabla 17 Propiedades dinámicas medidas, calculadas y calculadas para MC en torres y naves.

Edificio	Alturas de Torres y Naves (m)	Periodo Fundamental (Seg.)	Amortiguamiento (%)	Periodo Calculado (Seg.)	Amortiguamiento Calculado (%)	Periodo Calculado (MC) (Seg.)	Amortiguamiento Calculado (MC) (%)
Catedral	62	0.731528895	4.095	0.76034	3.3927	0.3392	2.83604
San Agustín	40.92	0.682593857	4.679	0.5630312	2.9386368	0.3685012	2.8004148
San José	39.66	0.48756704	2.992	0.5512376	2.9114964	0.3702526	2.7982854
Capuchinas	37.75	0.568828214	3.562	0.53336	2.870355	0.3729075	2.7950575
Templo de la Merced	31.33	0.445235975	2.804	0.4732688	2.7320682	0.3818313	2.7842077
San Diego	28	0.465549348	-	0.4421	2.66034	0.38646	2.77858
Templo de las Monjas	27.34	0.639795266	2.976	0.4359224	2.6461236	0.3873774	2.7774646
Templo del Carmen	27.33	0.409668169	-	0.4358288	2.6459082	0.3873913	2.7774477
Biblioteca Pública	25.39	0.137873983	-	0.4176704	2.6041206	0.3900879	2.7741691
San José	19.26	0.292568754	2.251	0.3602936	2.4720804	0.3986086	2.7638094
Catedral	19.05	0.3638	2.688	0.358328	2.467557	0.3989005	2.7634545
San Agustín	17.35	0.42662116	2.771	0.342416	2.430939	0.4012635	2.7605815
Templo del Carmen	15.96	0.24378352	1.872	0.3294056	2.4009984	0.4031956	2.7582324
Templo de las Rosas	15.7	0.465549348	1.056	0.326972	2.395398	0.403557	2.757793
Biblioteca Pública	14.86	0.283366393	4.652	0.3191096	2.3773044	0.4047246	2.7563734
Templo de las Monjas	13.58	0.330360093	3.572	0.3071288	2.3497332	0.4065038	2.7542102
San Diego	13.11	0.255167134	4.918	0.3027296	2.3396094	0.4071571	2.7534159
Templo de la Merced	11.69	0.32	2.058	0.2894384	2.3090226	0.4091309	2.7510161



Comparando los resultados de las fórmulas con los datos medidos, se puede apreciar que los que arrojaron mejores resultados para el cálculo del período fundamental son los correspondientes a los ajustes de las figuras 97, 99 y 101 a diferencia de los valores calculados con los ajustes de las simulaciones, los cuales son muy similares entre sí pero muy alejados con respecto a los valores medidos.

En cambio para los amortiguamientos los valores correspondientes a los ajustes en las simulaciones son más aproximados a los medidos que los valores calculados con los ajustes de las figuras 98, 100 y 102, ya que en estas figuras los datos son muy dispersos, caso contrario de los valores de la simulación (ver figuras 93 a 95).



7.- CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en las tablas 12 a 14 del capítulo 6, se puede apreciar en relación a la correlación de la altura contra el periodo de vibración en edificios religiosos, que tanto para torres como naves se obtienen resultados muy similares al emplear su correspondiente fórmula individual (ver figuras 97 y 99) que al utilizar la fórmula general (ver figura 101). Referente al amortiguamiento no se obtiene una verificación tan aproximada como en el caso de los periodos (ver tablas 12 a 14), sin embargo las funciones obtenidas dan una idea de los amortiguamientos esperados en este tipo de edificaciones ante niveles bajos de vibración, y pueden servir para el conjunto particular analizado como valores de referencia para estudiar posibles degradaciones posteriormente a terremotos de gran intensidad; pasando por alto lo anterior, para el caso de torres la fórmula general resulta más adecuada para su aplicación práctica (ver figura 102), mientras que para naves (ver figuras 98, 100 y 102) se sugiere que puedan ser utilizadas de manera indistinta. En cambio, los resultados obtenidos en las simulaciones de Monte Carlo para los periodos relacionados con las alturas de torres y el caso general (torres y naves) no son aproximados (ver tablas 6 y 8), situación que se mejora en el caso de las naves (ver tabla 7).

De igual manera para los amortiguamientos, los resultados de la simulación para la formulación individual de las naves (ver tabla 7), son los que más se aproximan a los valores producto de las mediciones, a diferencia de la formulación para las torres y la del caso general (ver tabla 6 y 8) donde la simulación no es satisfactoria.

De los resultados obtenidos de las formulaciones en las simulación de Monte Carlo, se puede apreciar que los mejores resultados obtenidos tanto para periodos como amortiguamientos están asociados a las alturas menores y con mayor uniformidad, como lo es el caso de las naves; por otra parte para las torres los



resultados no son los más satisfactorios lo cual se sabe que las alturas en estas no son tan uniformes comparativamente con el caso de las naves. Las causantes de esto son las torres de la Catedral, ya que como se mencionó en capítulos anteriores al ser las torres construidas en mampostería de mayor altura a nivel nacional, generan debido a su desproporción dentro de la semilla estadística, un gran salto que afecta negativamente la simulación de Monte Carlo. Otro motivo por el cual los resultados de las simulaciones no son enteramente satisfactorios es que en un principio se pensó que la muestra estudiada sería suficiente, ha quedado claro que no ha sido de esa manera, y convendría como línea futura ampliar dicha semilla para mejorar nuevos procesos de simulación.

Por último, el hecho de presentar un primer conjunto de expresiones para la evaluación del periodo de vibración de estructuras patrimoniales del centro histórico de Morelia, pretende ser un primer acercamiento a la elaboración de un catálogo de riesgo patrimonial, ya que combinadas con información de peligrosidad sísmica y caracterización dinámica del terreno o microzonificación, permitirá hacer evaluaciones rápidas del nivel de vulnerabilidad esperado, al poder comparar el periodo fundamental de las estructuras con el del suelo, acotando el conjunto de edificios que se deberán de estudiar con detalle para fines de evaluar su vulnerabilidad con métodos detallados.

La presente investigación por tanto, forma parte de un primer paso hacia el mejor entendimiento del comportamiento estructural de nuestras edificaciones patrimoniales, con vistas a lograr en el corto plazo propuestas de diagnóstico adecuadas que redundan en intervenciones científicas y respetuosas, de cara a una sólida preservación de nuestra herencia arquitectónica a las futuras generaciones.



Anexo I

GLOSARIO

Ábside. Remate oriental de la nave adosado a las cabeceras de las iglesias. Su planta remata en semicírculo, por lo general, en el románico, y poligonalmente en la arquitectura gótica. Por extensión se llama así a toda cabecera de una iglesia, incluyendo la capilla mayor, la girola y las capillas absidales.

* Parte del templo, abovedada y comúnmente semicircular, que sobresale en la fachada posterior.

Amortiguamiento. Propiedad de un material o una estructura que le permite disipar parte de la energía asociada a la vibración de dicha estructura. Depende de varios factores, y mientras mayor sea el amortiguamiento, menor serán las amplitudes del movimiento y de los esfuerzos introducidos en la estructura por su vibración.

Amplitud. Valor máximo de una cantidad que varía en forma cíclica, como una deformación o una carga dinámica.



Arbotante. Arco rampante que transmite en estado pasivo el empuje de una bóveda a un machón o estribo exterior llamado botarel. En estado activo puede transmitir los empujes resultantes de la acción del viento sobre la techumbre. Con frecuencia los arbotantes son dobles: el superior resiste el viento y el inferior el empuje de la bóveda. Por lo general soporta un trozo de muro, macizo o calado, que se corona con un nervio o albardilla inclinada, que suele contener un canal para conducir el agua de lluvia desde la cubierta a las gárgolas que la arrojan fuera del edificio.

* Elemento exterior inclinado, normalmente en forma de arco que funge de contrafuerte para transmitir el empuje lateral desde el arranque de una bóveda, o arco, a la parte superior de un apoyo más bajo (muro o pilar).

Arco. Elemento estructural curvo que transmite las cargas fundamentalmente mediante esfuerzo de compresión. La forma de transmisión de las cargas viene dada por la posición de su línea de empujes.

- ♦ **Crucero.** El que, arrancando de un apoyo, pasa por la clave principal de una bóveda nervada. Los arcos cruceros de las bóvedas nervadas son los únicos que, en rigor, se deberían llamar arcos ojivos. El arco ojival refuerza el pliegue de encuentro de dos cáscaras.
- ♦ **Fajón.** El volteado en un plano perpendicular al eje de la nave. En especial se llama así el que “refuerza” una bóveda de cañón seguido, dividiéndola en dos tramos.
- ♦ **Formero.** El que recibe la intersección de la bóveda con el muro de cerramiento. En las naves de las iglesias van los formeros en lo alto de los muros laterales y sobre ellos acometen los plementos a dichos muros.

Atrio. Patio central circuido de columnas.



Basílica. Templo de una nave, con crucero. Iglesia antigua, amplia y suntuosa.

Botarel. Contrafuerte, machón para reforzar un muro. El arco botarel consiste en un arco que arranca de un botarel.

Bóveda. Obra de fábrica arqueada que cubre un espacio comprendido entre muros o pilares.

- ♦ **De abanico.** También llamada palmeada. Aquella cuyos nervios se abren a partir de los arranques como las ramas de una palmera o las varillas de un abanico.
- ♦ **De arista.** La formada por la intersección de dos bóvedas de cañón de igual altura y con el mismo plano de arranque, siendo sus aristas salientes hacia el interior de la bóveda.
- ♦ **De cañón.** Aquella cuyo intradós es cilíndrico. La sección transversal puede ser un semicírculo o un arco apuntado. Si la superficie es continua, se dice de cañón seguido; pero es muy frecuente que presente resaltos en forma de arcos fajones que la dividen en tramos
- ♦ **Cuatricpartita.** La crucería sobre la planta cuadrada o rectangular, dividida en cuatro paños fundamentales.

Cabecera. Parte principal de una iglesia donde se encuentra en general el altar, y enfrente a los pies.

Capitel. Parte superior de una columna o pilastra. Lleva molduras y elementos decorativos, lo que establece las diferencias entre los órdenes.

Catedral. Templo principal de la diócesis, en el que se encuentra el trono del obispo.

Cimborio. Cuerpo cilíndrico que constituye la base de la cúpula.



Claustro. Galería que cerca el patio principal de una iglesia.

Clave. La dovela central que cierra un arco o bóveda. En una bóveda de cañón las claves están todas en una fila formando la línea de clave; en las bóvedas de crucería o arista las líneas de clave tienen forma de cruz o estrella según el número de nervios que se reúnen en su cima.

Columnata. Dícese de las columnas dispuestas en serie o fila.

Contrafuerte. Estribo o machón que se fabrica arrimado a un muro para fortificarlo. Al comenzar el estilo gótico se separaron los contrafuertes de los muros resistiendo el empuje de las bóvedas por medio de los arbotantes y quedaron convertidos en botareles.

Coro. Pare de la iglesia destinada al canto de los clérigos. Su ubicación fue cambiando con el tiempo y el lugar, pudiendo estar en la cabecera, al centro o los pies de la nave. En las iglesias del gótico francés e inglés se situaba normalmente en la cabecera.

Cúpula. Construcción abovedada de forma semiesférica, o aproximada, que cubre un área poligonal o circular. El paso de la planta cuadrada a la poligonal o circular, en su caso, se realiza mediante pechinas o trompas, organizando un anillo que sirve de soporte al tambor que funciona como realce de la cúpula, pudiendo tener vanos que iluminan su interior. En su parte superior puede terminar en un óculo, que puede quedar abierto o, con mayor frecuencia, ir cubierto por una linterna.

Dovela. Cada una de una de las piedras en forma de cuña, generalmente con una cara convexa y otra cóncava, que constituyen un arco o bóveda. Toda dovela tiene seis caras: la boquilla o intradós, el trasdós, los lechos o juntas de los costados, y las caras verticales que cuando son aparentes se llaman cabezas.



Elasticidad. Cualidad de un material que, habiéndose deformado bajo la acción de una fuerza, recupera su forma original al desaparecer aquélla.

Frecuencia de vibración. Número de ciclos de vibración por unidad de tiempo. Las estructuras tienen frecuencias naturales de vibración que dependen de su rigidez, masa y forma.

Frontispicio. Conjunto de la fachada principal de un edificio.

Intradós. Superficie que limita por su parte inferior un arco o bóveda.

Luneto. Bóveda practicada en otra bóveda mayor, de medio cañón, y destinada a dar entrada a la luz.

Mampostería. Obra de fábrica a base de piedras sin labrar, o poco labradas, aparejadas sin orden de hiladas ni tamaños y unidas con argamasa.

Masa. Cantidad de materia en un cuerpo. Es la propiedad de la que dependen las fuerzas de inercia que se producen debido a su movimiento dinámico y que son iguales al producto de la masa por la aceleración.

Modelo de simulación. Conjunto de hipótesis acerca del funcionamiento del sistema expresado como relaciones matemáticas y/o lógicas entre los elementos del sistema.

Módulo de elasticidad, de Young. Para un material dado, la relación entre la tensión y la deformación. Se expresa en unidades de tensión y es normalmente constante hasta el límite elástico.



Nave. Cada uno de los espacios que entre muros o filas de arcadas se extienden a lo largo de las iglesias u otros edificios.

Nervios. En una bóveda nervada los terceletes, ligaduras y arcos cruceros, perpiaños y formeros. En general, cualquier resalto sobre una bóveda.

Paramento. Cualquiera de las dos caras de un muro.|| Cualquiera de las caras de un sillar.

Período natural de vibración. El tiempo necesario para un ciclo completo de vibración. Es el recíproco de la frecuencia natural de vibración. El período fundamental es el más largo de los períodos naturales, y es el más importante en definir la respuesta dinámica de una estructura.

Plementos. Paños de sillarejo o mampostería, aparejados por hiladas, que cierran los compartimentos de las bóvedas de crucería, cargando sobre los arcos de nervios. Para los plementos se elegía, en general, la piedra más ligera disponible.

Proceso de simulación. Ejecución del modelo a través del tiempo en un ordenador para generar muestras representativas del comportamiento.

Rigidez. Cualidad de una estructura que no se deforma excesivamente bajo la acción de las cargas que tiene que soportar.

*Oposición de un material o elemento estructural a ser deformado. Junto a la resistencia es la propiedad básica en definir la respuesta de una estructura al sistema de cargas a que está sometida. Más rigurosamente se define como la carga necesaria para producir una deformación unitaria. Su inverso es la flexibilidad.



Riñón. En un arco o bóveda la zona del trasdós comprendida, aproximadamente, en la primera mitad de su altura.

Sillar. Piedra escuadrada que se emplea en la construcción.

Simulación. Es el proceso de diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un sistema o proceso y conducir experimentos con este modelo con el propósito de entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias con las cuales se puede operar el sistema.

Transepto. En una iglesia de planta cruciforme, cualquiera de los brazos laterales. También se emplea como sinónimo de crucero.

Trasdós. En un arco o una bóveda, es la superficie que los limita por la parte superior y externa, concéntricamente con el intradós, o aproximadamente.



Anexo II.- UBICACIÓN DE LAS IGLESIAS EN EL CENTRO HISTÓRICO.

- 1) Catedral
- 2) Carmen
- 3) Capuchinas
- 4) Merced
- 5) Biblioteca
Publica
- 6) Las Rosas
- 7) San José
- 8) Las Monjas
- 9) San Agustín
- 10) San Diego





REFERENCIAS

Bendat J.S., Piersol A.G. (1986), **“Random Data, Analysis and Measurement Procedures”**, Wiley & Sons, New York.

Bendat J.S., Piersol AG. (1993), **“Engineering applications of correlation and spectral analysis”**. 2nd ed. USA, New York: Wiley Interscience.

Cruz A., Ramírez H., Valdez E., (2011), **“Metodología Para Evaluar Vulnerabilidad Sísmica Mediante Simulación De Montecarlo: Aplicación A Sultepec, Estado De México”**, XVII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Aguascalientes, Aguascalientes.

Doglioni F., Moretti A. y Petrini V. (1994), **“Churches and earthquakes”**, LINT, Trieste (en italiano).

Espinoza F. (1999), **“Determinación de Características Dinámicas de Estructuras”**, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

Kinemetrics Inc. (2008), www.kinemetrics.com/p-76-Etna.aspx

Konopinski, E. J, C. Marvin; Edward Teller (1946). **"Ignition of the Atmosphere with Nuclear Bombs"**. Informe técnico del Laboratorio Nacional de Los Alamos, LA-602

López A., Corona J.C., Pérez L. E., Cordero C., Arriaga A. (2010), **“Caracterización De La Resistencia De Estructuras De Celosía Mediante Simulaciones De Monte Carlo Para El Análisis De Vulnerabilidad Ante Peligros Por Viento Y Sismo”**, XVII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, León, Guanajuato.

Martínez G., Rojas R., Infante H. (2009), **“Comportamiento sísmico del histórico Colegio Primitivo y Nacional de San Nicolás en Morelia, Michoacán”**, XVII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puebla, Puebla.

Martínez G., Rojas R., Gaytan R. (2009), **“Caracterización Dinámica de las Torres de la Catedral de Morelia”**, XVII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puebla, Puebla.



Meli Piralla R., (2008), **“Diseño Estructural”**, Segunda Edición, Ed. Limusa, pp. 261-313.

Nieto M, Rivero P., Lobo W., (2009), **“Análisis dinámico lineal de una edificación histórica en San Cristóbal, Estado Táchira”**, Artículo de Investigación Revista Ciencia e Ingeniería. Vol. 30, No. 3, pp. 237-246, agosto-noviembre, 2009. ISSN 1316-7081.

Oliveira C.S., (1997), **“Frequências próprias de estruturas com base em medições expeditas in-situ”**(en portugués), 3º. Encontro Sobre Simologia e Engenharia Sísmica, Instituto Superior Técnico, Portugal.

Rojas R., Jara J.M., Martínez G., (2011), **“Time Domain vs. Frequency Domain System Identification of the Dynamic Parameters for a Group of Bridges located in Mexico”**

@RISK, (2011), <http://www.palisade-lta.com/risk/>

Segura O., Martínez G. (2010), **“Matrices de Probabilidad de daño para edificios del Centro Histórico de la Ciudad de Morelia”**, Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, León, Guanajuato, pp. 1-13.

Svibs, Structural Vibration Solutions (2011), www.svibs.com/products/ARTEMIS_Extractor.aspx