

INFLUENCIA DE LOS TRATADOS HISTÓRICOS DE LA CONSTRUCCIÓN EN LAS PROPORCIONES GEOMÉTRICAS DE LOS EDIFICIOS HISTÓRICOS RELIGIOSOS DE MÉXICO

R Pérez, Isis*; Vasconcelos, Graça; B Loureço, Paulo****

¹isis.rodriguez@correo.uady.mx, ²graca@civil.uminho.pt, ³pbl@civil.uminho.pt

** Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Arquitectura*

*** Universidad de Minho, Facultad de Ingeniería, ISISE*

Palabras-clave: Iglesias de México, bóvedas de cañón corrido, reglas empíricas, reglas geométricas, tratados históricos europeos

Resumen

Este trabajo se enfoca en edificios históricos religiosos de los siglos 16th al 18th ubicados en México. Se estudian iglesias de mampostería con un sólo vano y bóvedas semicirculares apoyadas sobre muros portantes. El objetivo es establecer correlaciones geométricas entre las principales variables de la sección transversal típica y las reglas empíricas propuestas en los tratados históricos de construcción europeos. Para ello 1) se conformó una base de datos de iglesias Mexicanas; 2) se establecieron correlaciones geométricas simples entre los principales parámetros y el vano de la bóveda, 3) se realizó un amplio estudio de los tratados históricos europeos desarrollados entre los siglos 16th y el 18th, y finalmente 4) se realizó un análisis comparativo entre las proporciones geométricas de las iglesias estudiadas y las propuestas en los tratados históricos europeos. Los resultados revelaron que los constructores mexicanos habrían incorporado algunos conocimientos existentes, posiblemente introducidos por los exploradores españoles.

1 INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, los edificios históricos religiosos son un importante legado que forma parte de la historia y desarrollo de cada lugar, lo que les proporciona un valor intangible e incalculable y hace prioritaria su conservación.

El conocimiento de las posibles reglas geométricas que estuvieron en la base de la construcción de elementos estructurales, como las bóvedas, es particularmente útil cuando se pretende intervenir edificios caracterizados por este elemento constructivo. Según Brenich y Morbiducci (2007) se dispone de escasos estudios sobre las características geométricas de las estructuras históricas que permiten un análisis ampliado y sistemático de esta tipología constructiva.

Una de las tipologías más observadas en este tipo de construcciones, es aquella que muestra una planta rectangular con un solo vano y cubierta a base de bóveda semicircular apoyada en muros portantes. Por el año de su construcción, este tipo de edificios se construyeron en su mayoría a base de mampostería. En consecuencia, este trabajo se enfoca en edificios históricos religiosos de los siglos 16th al 18th ubicados en México. Se estudian iglesias de mampostería con un sólo vano y bóvedas semicirculares de mampostería apoyadas sobre muros portantes también de mampostería.

En México, las acciones para la conservación de este tipo de edificios han dejado al descubierto, la escasez de estudios sobre sus características geométricas. Los estudios existentes evidenciaron que estas iglesias tienen diferentes espesores de muro, diferentes espesores de bóveda, diferentes alturas de bóveda y diferentes alturas de muro entre otros, dejando entrever la aparente falta de correlación entre los parámetros críticos de su sección transversal típica. Debido a ello, este trabajo tiene como objetivo establecer las correlaciones geométricas entre las principales variables de la sección transversal típica y su relación con las reglas empíricas propuestas en los tratados históricos de construcción europeos.

2 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Con el propósito de establecer las correlaciones geométricas, esta investigación se estructuró en 4 tareas fundamentales (Figura 1).



Figura 1: Metodología

La base de datos (Tarea 1) se desarrolló mediante una profunda revisión de 1) la literatura y 2) un gran número de repositorios públicos y privados. Fue posible definir una base de datos de 79 iglesias de los siglos XVI al XVIII; 44 correspondientes al estado de Yucatán, que representan 38% de las iglesias existentes en el estado de Yucatán y 35 ubicadas en los estados de Oaxaca (al sur, 5 iglesias), Morelia (al oeste, 12 iglesias) y Morelos (en el centro, 18 iglesias). La base de datos contenía las principales características geométricas, es decir, las dimensiones relacionadas con la planta principal, los muros y las bóvedas, como el vano, las longitudes, las alturas y el espesor.

La Tarea 2 consistió en establecer correlaciones geométricas simples entre los principales parámetros y el vano de la bóveda; para las iglesias de Yucatán, se decidió

eliminar datos hasta que las correlaciones estadísticas mejoraran de forma que el coeficiente de determinación (r^2) presentara un valor mayor o igual a 0.6; a esta correlación se le llamó correlación estadística significativa. Es importante señalar que para este proceso se revisaron los valores atípicos y residuales con respecto a las variables clave para tomar la decisión más acertada. Considerando el vano de la bóveda (L) como variable independiente, se definieron dos tipos de correlaciones lineales entre los parámetros geométricos y el vano (L), (1) correlación lineal del tipo $y=ax_i + b$; (2) correlación lineal del tipo $y=ax_i$ ($b=0$). El objetivo fue determinar la dependencia entre las variables x (independiente) e y (dependiente) que mejor se ajuste a la distribución.

Por último, utilizando histogramas y diagramas de distribución normal, se definió, un intervalo ($\text{Media} \pm \text{SD}$) con las relaciones más frecuente existentes entre los parámetros geométricos clave y el vano (relación parámetros clave/vano).

En las iglesias de Oaxaca, Morelia y Morelos, se realizó un análisis estadístico similar al desarrollado para las iglesias de Yucatán. La calidad de los datos se evaluó analizando la existencia de valores atípicos, tras lo cual se realizaron pruebas de normalidad. Se realizó un análisis de regresión simple entre el vano (L) y los demás parámetros geométricos clave, entre los que se encuentran, la altura de los muros (H_w), la altura de las bóvedas (H_v), el espesor de los muros (t_w), el espesor de las bóvedas (t_v) y la altura total de las iglesias (H). Adicionalmente, se determinó el intervalo más frecuente para la relación ($\text{Media} \pm \text{SD}$) entre los parámetros clave y el vano (L), identificando los valores mínimo y máximo.

La Tarea 3 consistió en realizar un amplio estudio de los tratados históricos europeos desarrollados entre los siglos 16th y el 18th, debido a la inexistencia de tratados de construcción en México (N. García and Meli, 2007).

Finalmente, la Tarea 4, consistió en realizar un análisis comparativo entre las proporciones geométricas de las iglesias estudiadas y las propuestas en los tratados históricos europeos.

3 REVISIÓN DE LOS RESULTADOS

3.1 Análisis estadísticos de los principales parámetros geométricos

Primeramente, se definieron las variables que caracterizan la sección transversal típica de las iglesias yucatecas de una nave; cubiertas con bóveda de cañón corrido. Estas variables geométricas clave son: el vano (L), la longitud (d), la altura total en el intradós (H), la altura del muro (H_w), la altura de las bóvedas (H_v), el espesor de los muros de mampostería (t_w), el espesor de las bóvedas (t_v) y la altura del relleno en el extradós (E_w), ver Figura 2a.

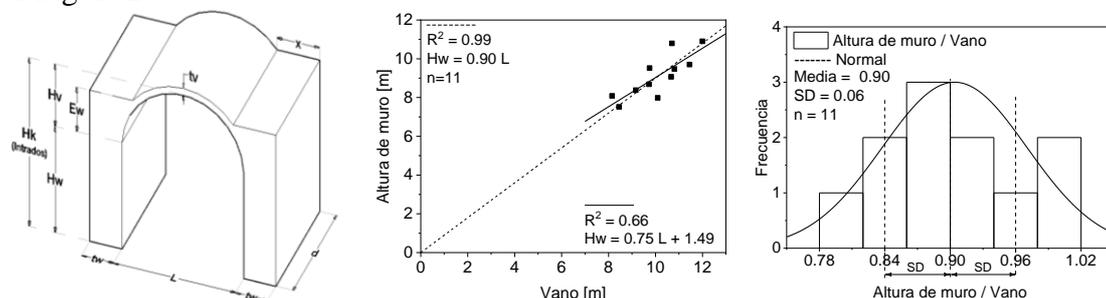


Figura 2: (a) Variables geométricas clave de la sección transversal de iglesias de un solo vano, (b) iglesias con correlación estadística significativa entre la altura de los muros y el vano; (c) histograma de la relación altura muro/vano

Posteriormente, para las iglesias de Yucatán, se realizaron los análisis de regresión simple entre el vano (L) y los parámetros geométricos clave (Figura 2b).

La Tabla 1 muestra los resultados de las correlaciones estadística significativa, donde se puede observar correlaciones razonables y correlaciones muy buenas ($r^2 > 0.9$). También resulta interesante observar que el espesor de la bóveda aumenta a medida que aumenta el vano, lo que revela una buena comprensión del comportamiento de las estructuras por parte de los constructores de la época. Por otro lado, las correlaciones lineales que pasa por el origen ($b=0$), revelaron resultados muy interesantes (Tabla 1).

Del análisis de histogramas y diagramas de distribución normal, se definieron las relaciones más frecuentes entre los parámetros geométricos clave y el vano (relación parámetros-clave/vano), ver Figura 2c. Considerando los valores máximos y mínimos equivalentes a $\pm SD$ (distribución estándar), los intervalos incluyeron el 68% de los datos. Los valores medios propuestos para las 'Relación parámetros-clave/vano' (ver Tabla 1), se ajustan a las expresiones lineales simples utilizadas para correlacionar los parámetros clave y el vano ($b=0$), véase la Tabla 1.

Tabla 1: (a) Correlación estadística significativa entre las variables geométricas y el vano, (b) rangos de frecuencias seleccionados a partir de la relación parámetros-clave/vano

(a) Correlación estadística significativa				(b) Relación de parámetros clave/vano			
Variables	r^2	ecuación con $b \neq 0$	ecuación con $b=0$	Relación	Mínimo	Máximo	Media
					[-SD]	[+SD]	
<i>Hw vs L</i>	0.66	$Hw=0.75L+1.49$	$Hw=0.90L$	<i>Hw/L</i>	0.840	0.960	0.900
<i>Hv vs L</i>	0.92	$Hv=0.50L-0.048$	$Hv=0.50L$	<i>Hv/L</i>	0.480	0.510	0.495
<i>tw vs L</i>	0.69	$tw=0.24L+0.43$	$tw=0.28L$	<i>tw/L</i>	0.260	0.300	0.280
<i>tv vs L</i>	0.93	$tv=0.036L+0.10$	$tv=0.045L$	<i>tv/L</i>	0.044	0.048	0.046
<i>H contra L</i>	0.60	$H=1.29L+0.67$	$H=1.36L$	<i>H/L</i>	1.260	1.460	1.360

Por otra parte, los análisis de regresión simple de las iglesias de Oaxaca, Morelos y Morelia indican que, además del espesor de las bóvedas con relación al vano (relación tv vs L), la ecuación lineal se ajusta razonablemente bien en las demás variables, esto es, que los datos presentaron en la mayoría de los casos, coeficientes de determinación muy razonables (r^2), superiores a 0.7, ver Tabla 2.

Los resultados revelaron que las bóvedas de cañón de las iglesias de Yucatán y Oaxaca van desde bóvedas reducidas hasta altas. La relación entre la altura de las bóvedas y los vanos (Hv/L) es de 0.43 a 0.57 para las iglesias de Yucatán y de 0.46 a 0.57 para las iglesias de Oaxaca. La anterior indica que la forma de estas iglesias se aproxima a las bóvedas de cañón semicircular ($Hw/L=0.5$) con una desviación máxima de aproximadamente 14% correspondiente a las bóvedas de cañón alto y reducido. Respecto a las iglesias de Morelia, la desviación de las bóvedas reducidas respecto a las semicirculares es mayor, correspondiendo a la relación $Hv=0.35L$.

En cuanto al espesor de las bóvedas (tv), todas las iglesias bajo análisis presentan un espesor mínimo alrededor de $0.05L$. Las iglesias de Morelos y Morelia presentan bóvedas con espesores máximos de $0.09L$ a $0.11L$ respectivamente, mientras que las bóvedas de las iglesias de Oaxaca presentan el espesor máximo de alrededor de $0.15L$ (Tabla 2 y Figura 3a). Esta diferencia sugiere que el mayor espesor de las bóvedas en las iglesias de Oaxaca puede atribuirse a la mayor peligrosidad sísmica de esta región, ver Figura 3b. Nótese que, a pesar del coeficiente de variación encontrado para el espesor de las bóvedas en las iglesias de Oaxaca, no existen valores atípicos en la base de datos. Por lo tanto, se recomienda ampliar la base de datos de las iglesias de Oaxaca.

Tabla 2. Relaciones entre los parámetros geométricos clave y el vano

Variable	Datos	Relación entre parámetro geométrico y L			SD	CV	Ecuación	r^2
		Mínimo	Máximo	Media				
Lugar	número				(%)			
H_w vs L								
Yucatán	23	0.59	1.01	0.84	0.14	17	-	-
Morelia	11	0.97	1.33	1.13	0.12	11	$H_w=0.79L+2.87$	0.70
Oaxaca	5	0.57	0.69	0.63	0.04	7	$H_w=0.66L-0.20$	0.77
H_v vs L								
Yucatán	19	0.43	0.57	0.49	0.03	7	$H_v=0.37L+1.17$	0.72
Morelia	11	0.35	0.55	0.46	0.11	24	$H_v=0.52L-0.52$	0.74
Oaxaca	5	0.46	0.57	0.50	0.04	8	$H_v=0.37L+0.97$	0.74
tw vs L								
Yucatán	21	0.13	0.32	0.24	0.06	24	-	-
Morelia	11	0.12	0.22	0.18	0.03	16	$tw=0.23L-0.44$	0.75
Oaxaca	5	0.15	0.29	0.24	0.05	22	$tw=0.40L-1.10$	0.62
Morelos	17	0.11	0.19	0.15	0.02	15	$tw=0.15L+0.06$	0.51
tv vs L								
Yucatán	9	0.034	0.058	0.046	0.007	16	-	-
Ciudad de Morelia	12	0.046	0.097	0.071	0.016	22	-	-
Oaxaca	4	0.050	0.153	0.098	0.042	43	-	-
Morelos	11	0.042	0.086	0.062	0.012	20	-	-
H contra L								
Yucatán	25	1.03	1.67	1.35	0.18	13	-	-
Morelia	9	1.52	1.87	1.61	0.11	7	$H=1.16L+3.84$	0.97
Oaxaca	5	1.06	1.20	1.13	0.06	5	$H=1.03L+0.77$	0.87
Morelos	17	1.10	1.83	1.44	0.22	15	$H=1.98L-5.52$	0.68

En Figura 3c, es evidente que las iglesias de Morelia presentan la relación más alta entre la altura de los muros y el vano de la bóveda (H_w/L), con un valor promedio de $1.1L$, mientras que las iglesias de Oaxaca presentan los valores más bajos para la misma relación con un valor promedio de $0.6L$, ver Figura 3c. Los valores de la relación H_w/L encontrados para las iglesias de Yucatán se encuentran en su mayoría entre las iglesias de Oaxaca y Morelia, oscilando entre $0.59L$ y $1.01L$.

En cuanto al espesor de los muros (tw), se observa que las iglesias del sur (Yucatán y Oaxaca) presentan un mayor espesor que va de $0.10L$ a $0.30L$, mientras que el espesor de los muros en las iglesias de Morelia y Morelos va de $0.10L$ a $0.20L$, ver Figura 3d.

Finalmente, la altura total de las iglesias mexicanas oscila entre L y $1.8L$, de manera similar a lo reportado por García (2008).

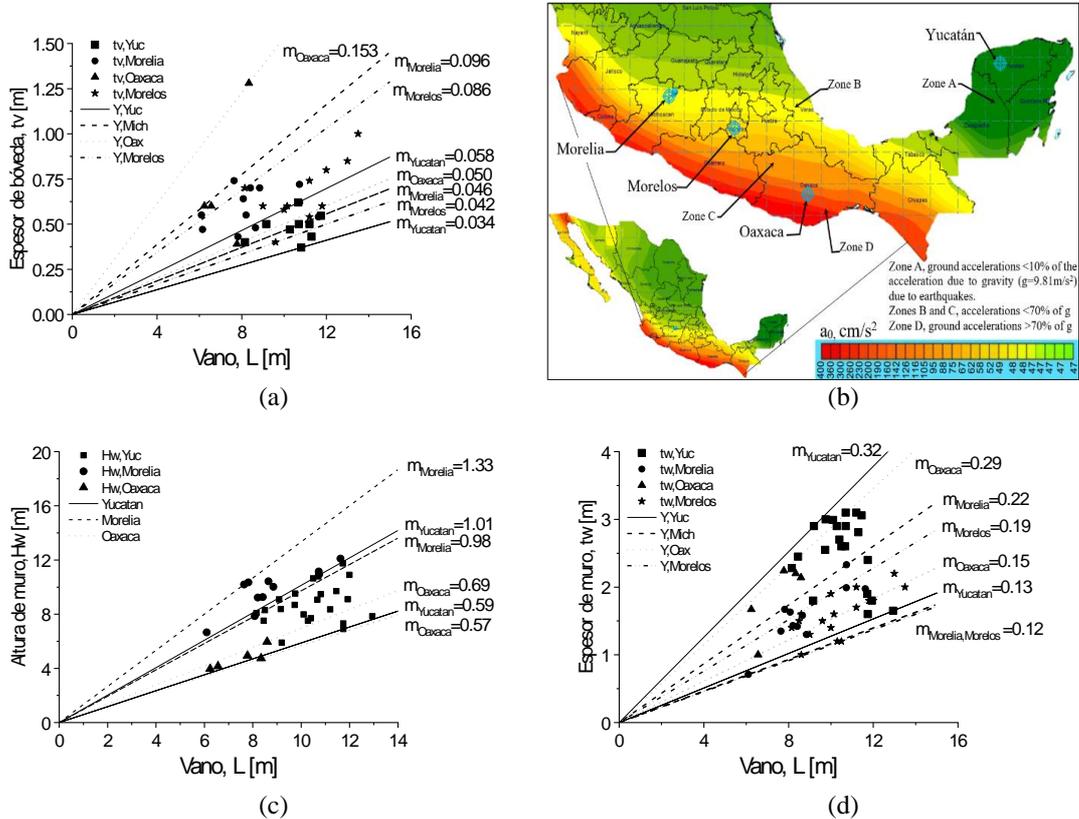


Figura 3: Comparación de la variación de los parámetros geométricos clave y el vano (L) para iglesias con bóveda de cañón y vano único; (a) H_v vs L , (b) t_v vs L , (c) H_w vs L , (d) t_w vs L , (e) H vs L and (f) mapa de aceleraciones sísmica de la roca, adaptado de PRODISIS (2017).

3.2 Revisión de los Tratados históricos de construcción europeos

Se revisaron las reglas geométricas europeas descritas en manuscritos históricos, manuales y tratados escritos entre los siglos XVI al XVIII. Los manuscritos estudiados fueron publicados en la misma época de construcción de las iglesias yucatecas y es probable que los constructores y frailes de las iglesias mexicanas no tuvieran acceso a ellos. Sin embargo, también es posible que los constructores de las iglesias mexicanas conocieran los cálculos geométricos que proponen, ya que, antes de los tratados y manuscritos, el conocimiento se transmitía de manera oral. Con ello se espera que la influencia de los constructores españoles se pueda apreciar en los edificios religiosos franciscanos.

Hasta el siglo XV, los tratados de arquitectura no proporcionaban información sobre el diseño arquitectónico. Las reglas estaban muy protegidas y sólo estaban disponibles de forma oral para los miembros del gremio, manejándose en secreto de persona a persona. Hasta que las estrictas normas de salvaguardia se relajaron, se escribieron los manuscritos, manuales y tratados históricos, que obtuvieron gran parte de sus conocimientos a través del análisis de edificios antiguos (Gaetani et al., 2016; Fangary, 2010).

Desde el siglo XVI hasta el siglo XVIII, diferentes autores elaboraron en Europa varios manuscritos históricos, manuales y tratados con el objetivo de proporcionar reglas empíricas y geométricas para los edificios, Tabla 3.

Tabla 3: Autores de manuscritos, manuales y tratados históricos de los siglos XVI al XVIII.

Siglo	Tratados
siglo XVI	Vitruvio en 1486 (Sagredo, 1549) Baptista Alberti en 1485 (Loçano, 1582) Lorenz Lechler en 1516 (Sanabria, 1982) Serlio en 1537 (Villalpardo, 1552) Rodrigo Gil de Hontañón en 1544 (S. García, 1681; Sanabria, 1982) Paladio en 1570 (J. F. Ortiz y Sanz, 1797)
siglo XVII	Hernán Ruiz el Mozo en 1560 (Navascués Palacio, 1974) Xines Martínez de Arana (1600) Fray Lorenzo de San Nicolás(1639) François Derand (1643) Simón García (1681) François Blondel (1683)
siglo XVIII	Philippe de La Hire (1695, 1712) Bernard Bélidor (1725, 1729, 1755) Frézier (1737, 1768, 1769) García Berruguilla (1747) Perrault (1761) Gauthier en 1765 (Brencich et al, 2007, Huerta, 1990) Pol y Camin (1767) Ortiz y Sanz (1787) Perronet en 1788 (Huerta, 1990)

Tabla 4: Reglas para el grosor de las paredes

Reglas empíricas	Paredes/Colchones
Lorenz Lechler en 1516 (Sanabria, 1982)	$t_w = 3/10L$ (+1.4% -2.4%) (Sanabria, 1982) $t_w = 1/10L$ (Huerta, 1990)
Rodrigo Gil en 1544, Regla 1. Para contrafuerte (Sanabria, 1982)	$t = 1/4L_w$
Rodrigo Gil en 1544, Regla 4. Profundidad del Contrafuerte del Arco Semicircular (Sanabria, 1982)	$t_w = \sqrt{(H+P)/2}$
A.Palladio en 1570 (J. F. Ortiz y Sanz, 1797)	$t_w \geq 1/3L$
Fr_Laurencio de San_Nicolas (Fr Laurencio, 1639)	$t_w = 1/3L$ (sin contrafuerte) $t_w = 1/6L$ (con contrafuerte) y $t_{buttress} = 1/6L$ $t_w = 1/7L$ (con cualquier empuje) $t_w = 1/7L$ (bóvedas de ladrillo con contrafuerte) y $t_{buttress} = 4/21 L$ $t_w = 1/8L$ (bóvedas dobles de ladrillo con contrafuerte) y $t_{buttress} = 1/4L$ $t_w = 1/5L$ (bóvedas de ladrillo doble sin contrafuerte)
García Berruguilla (1747)	$t_w = 1/3L$ (bóvedas de piedra sin contrafuerte) $t_w = 1/6L$ (bóvedas de piedra con contrafuerte) y $t_{buttress} = 1/6L$ $t_w = 1/7L$ (con cualquier empuje) $t_w = 1/7L$ (bóvedas de ladrillo con contrafuerte) y $t_{buttress} = 4/21 L$ $t_w = 1/8L$ (bóvedas dobles de ladrillo con contrafuerte) y $t_{buttress} = 1/4L$ $t_w = 1/5L$ (bóvedas de ladrillo dobles sin contrafuerte)

t = espesor, L = luz, H= altura del muro, P= perímetro intradós del arco

De la revisión de estos manuscritos se extrajeron, analizaron y clasificaron todas las reglas propuestas para bóvedas de cañón con un solo vano. Para los muros se observaron y extrajeron reglas tanto geométricas como empíricas. La Tabla 4, se presenta la Reglas empíricas propuestas por diferentes autores para determinar el grosor de las paredes.

La Tabla 5, presenta las reglas propuestas por diferentes autores, para determinar el espesor de las bóvedas y la altura de sobrecarga en el extradós de las bóvedas.

Tabla 5: Espesor de la bóveda (t_v) y del relleno en el extradós de las bóvedas (E_w)

	Espesor de la bóveda	Relleno en el extradós de las bóvedas
Rodrigo Gil en 1544, Regla nº 7. Tercera fórmula geométrica. Primera parte (Sanabria, 1982)	$t_v = 1/6L$	
Rodrigo Gil en 1544, Regla nº 7. Fórmula geométrica de Tirth. Segunda parte (Sanabria, 1982)	$t_v = 1/5L$	
Hernán Ruiz el Mozo en 1560 (Navascués Palacio, 1974)	$t_v = 1/10L$	$E_w = 1/2H_v$
Xinés Martínez de Aranda (1600)	De 5 a 10 pies (aprox. 1.40-2.80 m) $t_v = 1/6L$ De 10 a 20 pies (aprox. 2.80-5.60 m) $t_v = 1/8L$ De 20 a 40 pies (aprox. 5.60-11.2 m) $t_v = 1/10L$	
Fr_Laurencio de San_Nicolas (1639)	-	$E_w = 1/3H_v$ (más secciones de pared para llegar a 2/3 de H_v)
Amédée-François Frézier (1768) (Huerta, 1990)	A lo largo del ángulo de apertura igual a 120 $t_v = 1/24L$ A lo largo del ángulo central igual a 30 $t_v = 2 \times (1/24L)$	
Bélidor (1725, 1729, 1755) (Huerta, 1990)	$t_v = 1/24L$ (bóveda semicircular) $t_v = 1/24L + 1 \text{ pies}$ (bóveda reducida)	
Gauthier en 1765 para bóveda de cañón semicircular (Brennich and Morbiducci, 2007)	$t_v = 0.32 + L/15$ (sólo arcos de mampostería)	
Jean Rodolphe Perronet en 1750, 1752, 1777 (Huerta, 1990)	$t_v = L/24 + 1 - L/144$ (para arcos de puentes)	
Jean Rodolphe Perronet en 1788 para bóveda de cañón semicircular (Brennich and Morbiducci, 2007)	$t_v = 0.325 + 0.0347L \approx 0.325 + L/30$ (sólo arcos de ladrillo)	
Jean Rodolphe Perronet en 1788 para bóvedas reducidas (Brennich and Morbiducci, 2007)	$t_v = 0.325 + 0.0694(L/2) \approx 0.325 + (L/2)/15$ $t_v = 0.325 + 0.0347L \approx 0.325 + L/30$ (sólo arcos de ladrillo)	
García Berruguilla (1747)	-	$E_w = 1/3H_v$
Plo y Camin (1767) bóvedas de piedra	-	$E_w = 1/2H_v$
Plo y Camin ⁽¹⁷⁶⁷⁾ bóvedas de ladrillo	-	$E_w = 2/3H_v$

Nota: ft = pies romanos, según (Gaetani et al., 2016) un pie romano equivale aproximadamente a 0.28 m. 1 pie = 12 pulgadas; 1 pulgada = 12 líneas (Huerta, 1990)

La Figura 4 muestra un resumen de las reglas empíricas propuestas en los tratados históricos europeos de construcción, entre las que se incluye: (1) espesor de las bóvedas, (2) altura del relleno en extradós, (3) espesor de los muros y (4) altura de los muros

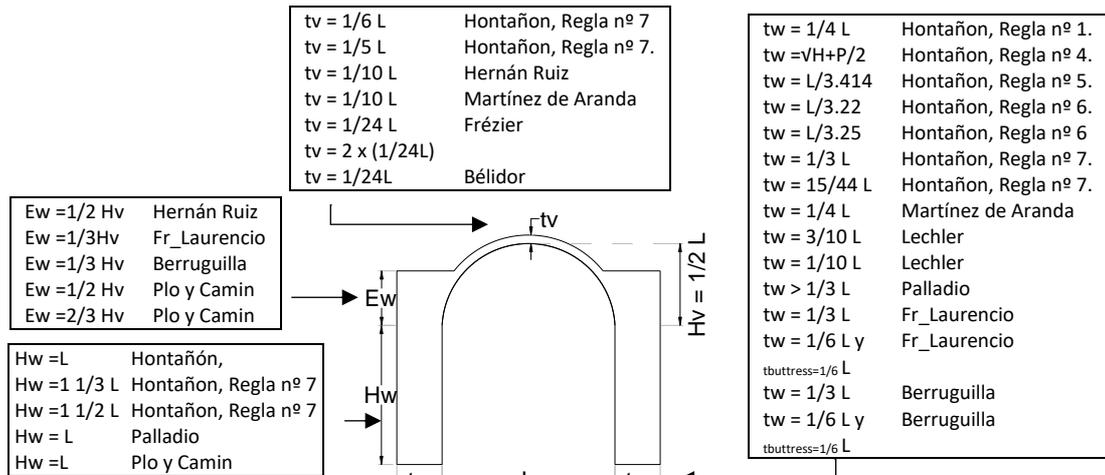


Figura 4: Reglas empíricas de los tratados históricos europeos de la construcción

3.3 Análisis comparativo entre los parámetros de las Iglesias de mexicanas y los propuestos en Tratados Europeos.

En esta sección, se proporciona una comparación entre los parámetros geométricos clave que describen la sección transversal de las iglesias yucatecas de un solo vano y los valores para los mismos parámetros proporcionados en los diferentes tratados históricos de construcción europeos.

El objetivo principal fue evaluar si los parámetros geométricos clave de las iglesias mexicanas de un solo vano seleccionadas, se encuentran en el rango de los valores proporcionados en los tratados históricos de construcción. Para ello, las reglas empíricas seleccionadas derivadas en la sección “Análisis estadísticos de los principales parámetros geométricos” para bóvedas semicirculares (Figura 5a) se compararon con las reglas geométricas más cercanas de los tratados históricos de construcción europeos (Figura 5b). La comparación revela que las dimensiones que caracterizan a las iglesias yucatecas de un solo vano con bóvedas de cañón semicirculares se aproximan razonablemente bien a algunas propuestas en los tratados.

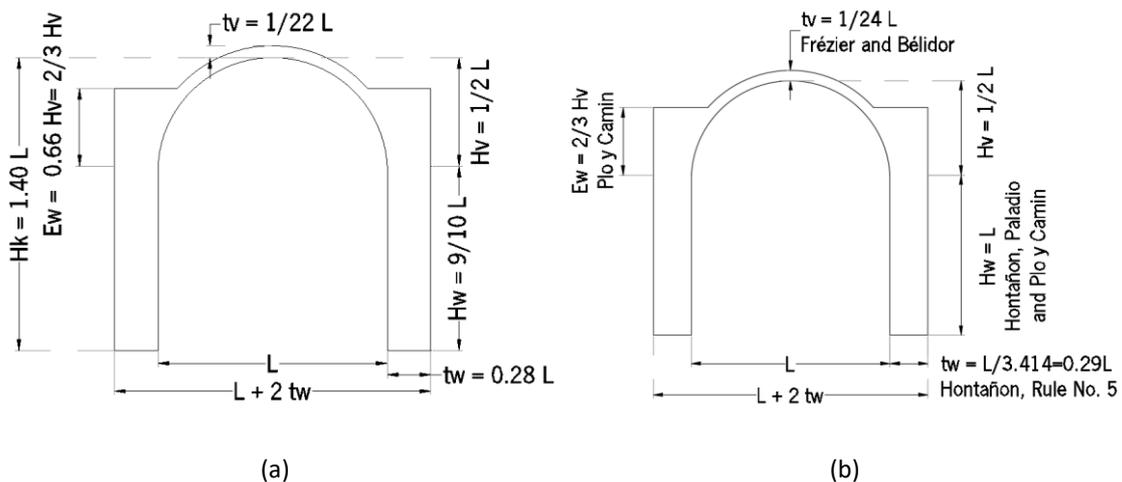


Figura 5: Perfiles geométricos de iglesias de un solo vano con bóvedas de cañón; (a) reglas empíricas derivadas para iglesias yucatecas; (b) reglas geométricas de tratados históricos de construcción europeos.

Adicionalmente, se realizó un análisis estadístico para determinar la dispersión y comportamiento de los datos de todas las iglesias mexicanas, respecto a las normas históricas.

Primeramente, se realizó una comparación entre el espesor de los muros y bóvedas en función del vano de las iglesias. Los resultados revelaron que el espesor de las bóvedas de todas las iglesias analizadas presenta una alta dispersión y en su mayoría oscila entre $L/24$ (Frezier Belidor) y $L/10$ (Ruiz Martínez), ver Figura 6a. Los valores encontrados para el espesor de las bóvedas (tv) en función del vano (L) en las iglesias de Yucatán presentan una variación significativa que va aproximadamente de $L/30$ a $L/17$. Los valores mínimos para el espesor de las bóvedas para las iglesias de Morelos, Morelia y Oaxaca son $L/24$, $L/22$ y $L/20$ respectivamente, los cuales se aproximan al valor propuesto por Frezier y Belidor ($L/24$), ver Figura 6a. Por otro lado, los valores máximos del espesor de las bóvedas, están entre $L/10.5$ y $L/11.5$, los cuales se encuentran en el rango propuesto por Frezier ($L/12$) y Ruiz-Martínez ($L/10$).

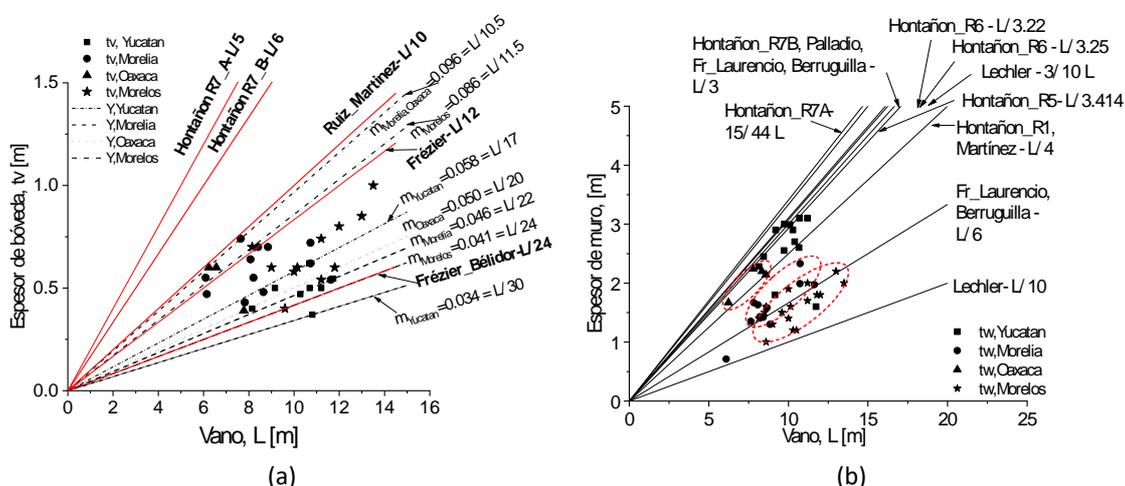


Figura 6: Análisis comparativo de parámetros geométricos de iglesias de México y propuestas proporcionadas en tratados históricos.

En cuanto al grosor de los muros, en las iglesias de Morelia y Morelos, ronda la regla histórica propuesta tanto por P_Laurencio como por Berruguilla ($tw = 1/6L$). En el caso de las iglesias de Morelia, el grosor de los muros va de $0.12L$ a $0.22L$ (aproximadamente $L/8$ y $L/4.5$) y en las iglesias de Morelos varía de $0.11L$ a $0.19L$ (aproximadamente $L/9$ a $L/5.25$), ver Figura 6b. Finalmente, el grosor de los muros en las iglesias de Oaxaca oscila entre $0.25L$ y $0.29L$ y se encuentra dentro de las reglas 1 y 5 ($tw = L/4$ y $tw = L/3.414$) propuestas por Hontañón (Sanabria, 1982), ver Figura 6b.

4 OBSERVACIONES FINALES

En esta investigación, se realizó un estudio geométrico estadístico que incluyó una base de datos de 79 iglesias mexicanas, con el objetivo de encontrar correlaciones estadísticas significativas entre 1) parámetros geométricos claves seleccionados y 2) los proporcionados en los diferentes tratados históricos de construcción europeos.

Primeramente, se derivaron reglas empíricas, considerando únicamente los datos que daban lugar a datos estadísticos significativos ($r^2 \geq 0.6$). También se definieron las relaciones más frecuentes entre los parámetros geométricos clave y el vano utilizando histogramas y diagramas de distribución normal. A partir de este procedimiento, fue

posible derivar expresiones en función del vano (L) para la altura de los muros (H_w), altura de las bóvedas (H_v), espesor de los muros (tw) y el espesor de las bóvedas (tv).

Adicionalmente, se realizó un análisis comparativo entre las iglesias mexicanas de Yucatán, Morelia, Oaxaca y Morelos. Todas ellas, iglesias con un solo vano y bóvedas de cañón. Los resultados revelaron que Oaxaca y Yucatán cuentan con bóvedas desde reducidas hasta altas; en contraste, las bóvedas de Morelia tienen una mayor tendencia a las bóvedas reducidas. Por su parte, el análisis del espesor de las bóvedas (tv) reveló que el espesor mínimo utilizado en las iglesias mexicanas es de aproximadamente $0.05L$, contrario a los espesores máximos que varían según el origen, es decir, Morelos ($0.09L$), Morelia ($0.1L$) y Oaxaca ($0.15L$).

Finalmente, del análisis comparativo entre los parámetros de las Iglesias de mexicanas y los propuestos en tratados históricos de construcción europeos de los siglos XVI al XVIII, se revela que las reglas geométricas empíricas encontradas para las iglesias mexicanas están en el rango de los diversos valores propuestos por diferentes autores. Lo anterior indica que, los constructores mexicanos incorporaron algunos conocimientos existentes en la época, posiblemente introducidos por los exploradores españoles.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al Instituto Nacional de Antropología e Historia de México (INAH), a la Comisión de Bienes Eclesiásticos y Arte Sacro de la Arquidiócesis de Yucatán, a la Facultad de Arquitectura de la Universidad Autónoma de Yucatán y al Programa de Desarrollo Profesional Docente (PRODEP) por toda su colaboración y apoyo.

REFERENCIAS

- Bélibidor, B. F. de. (1725). *Nouveau Cours de mathématique à l'usage de l'artillerie et du génie*. Paris Francia: Académie Royale des Sciences.
- Bélibidor, B. F. de. (1729). *La science des ingénieurs dans la conduite des travaux de fortification et d'architecture civile*. Paris Francia: Chez Claude Jombert.
- Bélibidor, B. F. de. (1755). *Dictionnaire portatif de l'ingénieur, où l'on explique les principaux termes des sciences les plus nécessaires à un Ingénieur, sçavoir*. Paris Francia: Chez Charles; Antoine Jomd.
- Blondel, F. (1683). *Cours d'Architecture V3*.
- Brencich, A., and Morbiducci, R. (2007). Masonry arches: Historical rules and modern mechanics. *International Journal of Architectural Heritage*, 1(2), 165–189.
- Calvo-Lopez, J. (1999). *Cerramientos y trazas de montea, de Ginés Martínez de Aranda*. (Departamento de Ideación Gráfica Arquitectónica Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, Ed.). Madrid, España. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10317/778>
- Derand, F. (1643). *L'Architecture des voues*. Paris: Imprimeur ordinaire du Roy.
- Fr Laurencio, de S. N. (1639). *Arte y uso de Arquitectura*. Primera parte. (Corte de Madrid, Ed.). Madrid: Plácido Barco López. Retrieved from https://ia801407.us.archive.org/3/items/arteyusodearquit01lore/arteyusodearquit01lore_bw.pdf
- Frézier, A. F. (1737). *La théorie et la pratique de la coupe de pierres et des bois pour la constution des voûtes et autres parties des bâtimnts civils et militaires. Tome 1* (Vol. 1). Paris Francia: Chez Charles; Antoine Jomdert.
- Frézier, A. F. (1768). *La théorie et la pratique de la coupe de pierres et des bois pour la constution des voûtes et autres parties des bâtimnts civils et militaires. Tome 2* (Vol. 2). Paris Francia: Chez Charles; Antoine Jomdert.
- Frézier, A. F. (1769). *La théorie et la pratique de la coupe de pierres et des bois pour la constution des voûtes et autres parties des bâtimnts civils et militaires. Tome 3* (Vol. 3). Paris Francia: Chez Charles; Antoine Jomdert.
- Gaetani, A., Monti, G., Loureço, P., and Marcari, G. (2016). Design and Analysis of Cross Vaults Along

- History. *International Journal of Architectural Heritage*, 10(7), 841–856.
- García Berruguilla, J. (1747). *Verdadera practica de las resoluciones de la geometria, sobre las tres dimensiones para un perfecto architecto, con una total resolucion para medir, y dividir la planimetria para los agrimensores*. (I. de L. F. Mojados, Ed.). Madrid: Imprenta de Lorenzo Francisco Mojados.
- García, N., and Meli, R. (2007). Estudio de las bases estructurales de los templos conventuales mexicanos del siglo XVI. *Boletín de Monumentos Históricos*, 11(0188–4638), 4–18. Retrieved from <http://www.boletin-cnmh.inah.gob.mx/boletin/boletines/3EV11P4.pdf>
- García, N., and Meli, R. (2008). On Structural Bases for Building the Mexican Convent Churches From the Sixteenth Century. *International Journal of Architectural Heritage*, 3(1), 24–51. Retrieved from <https://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=uarc20>
- García, S. (1681). *Compendio de arquitectura y simetría de los templos: conforme a la medida del cuerpo humano, con algunas demostraciones de geometría*. Salamanca, España. Retrieved from <http://bdh-rd.bne.es/viewer.vm?id=0000042291&page=1>
- Hassan Fangary, A. A. (2010). *Graphics analysis of gothic Vaults*. Universitat Politècnica de Catalunya, Spain. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Huerta, S. (1990). *Diseño estructural de arcos bovedas y cupulas en Espana ca. 1500 - ca. 1800*. Universidad Politecnica de Madrid, España. Retrieved from <http://oa.upm.es/549/>
- La Hire, P. de. (1695). *Traité de mécanique, ou l'on explique*. Paris Francia: Chez Jean Anissons.
- La Hire, P. de. (1712). Sur la construction des voûtes dans les édifices. *Mémoires de Mathématique et de Physique de l'Académie Royale Des Sciences*. Académie royale des sciences.
- Loçano, F. (1582). *Los Diez Libros de Arquitectura de Leon Baptista Alberto*. Madrid, España: Alfonso Gomez impresor de su magestad.
- Martinez_de_Arana, X. (1600). *Cerramientos y trazas de monte primera parte*.
- Navascués Palacio, P. (1974). *El libro de arquitectura de Hernán Ruíz, el Joven. Estudio y edicion critica*. (Escuela Tecnica Superior de Arquitectura, Ed.). Madrid.
- Ortiz y Sanz, J. (1787). *Los diez libros De Archítectura de M. Vitruvio Polión*. (I. Real, Ed.). Madrid.
- Ortiz y Sanz, J. F. (1797). *Los quatro libros de arquitectura de Andres Paladio, Vicentino*. MADrid: Imprenta Real. Retrieved from http://www.sedhc.es/bibliotecaD/1797_Andrea_Palladio_Los_cuatro_libros_de_arquitectura.pdf
- Perrault, C. (1761). *Compendio de los diez libros de Arquitectura de Vitruvio (Joseph Castaneda, Traduction)* (2nd ed.). Madrid: Imprenta de D. Gabriel Ramirez. Retrieved from http://www.cehopu.cedex.es/img/bibliotecaD/1761_C_Perrault_Los_diez_libros_de_arqu_de_Vitruvio
- Plo y Camin, A. (1767). *El arquitecto practico, civil, militar y agrimensor* (1st ed.). Madrid, España: Imprenta de Pantaleon Aznar.
- PRODISIS. (2017). PRODISIS (PROgrama de Diseño SíSmico) versión 4.1 (2017-08-15). Retrieved July 30, 2020, from <https://www2.ineel.mx/prodisis/es/prodisis.php>
- Sagredo, D. de. (1549). *Medidas del romano o Vitruvio nuevamente impressas y añadidas muchas piezas e figuras muy necessarias a los oficiales que quieren seguir las formaciones de las basas, columnas, capiteles y otras piezas de los edificios antiguos*. Toledo: Casa de Iván de Ayala.
- Sanabria, S. L. (1982). The Mechanization of Design in the 16th Century: The Structural Formulae of Rodrigo Gil de Hontañón. *Journal of the Society of Architectural Historians*, 41(4).
- Villalpardo, F. de. (1552). *Tercero y Quarto Libro de Architetura de Sebastian Serlio*. Toledo: Casa de Ivan de Ayala.