

- Índice
- Resumen
- Operaciones de adaptación para la edición como libro

ÍNDICE

Introducción

1 Antecedentes

1.1 Fuentes escritas consultadas en la obra de El Escorial	33
1.2 Bóvedas construidas antes de El Escorial	57
1.2.1 Bóvedas anteriores al siglo XVI	59
1.2.2 Bóvedas del siglo XVI en Italia y Francia	103
1.2.3 Bóvedas del siglo XVI en España	113

2 Desarrollo de la obra

2.1 Cronología de la construcción de las bóvedas	145
2.2 Artífices	159
2.3 Proceso constructivo	179

3 Descripción general

3.1 Bóvedas de cantería en los sótanos	200
3.2 Bóvedas de cantería en la planta principal	223

4 Bóvedas cilíndricas

4.1 Arcos y bóvedas cilíndricas en los tratados	250
4.2 Ejemplos anteriores	258
4.3 Bóvedas cilíndricas en el Monasterio de El Escorial	263
4.3.1 Trazados de arcos rebajados	265
4.3.1.1 Óvalo y elipse	265
4.3.1.2 Trazados elípticos en El Escorial	273
4.3.1.3 Óvalos en El Escorial	279
4.3.2 Lunetos	293
4.3.2.1 Lunetos cilíndricos en El Escorial	294
4.3.2.2 Lunetos apuntados en El Escorial	299
4.3.3 Bóvedas de arista	310
4.3.4 Bóvedas esquifadas	312

5 Bóvedas vaídas

5.1 Elementos y variantes	318
5.2 Bóvedas vaídas en los tratados	319
5.3 Ejemplos anteriores	322
5.4 Construcción en piedra. Trazas de cortes	325
5.5 Bóvedas vaídas en el Monasterio de El Escorial	326
5.5.1 Configuración geométrica y despieces. Diferencias	329
5.5.2 Bóvedas vaídas en los sótanos	333
5.5.3 Bóvedas vaídas en la planta principal	336
5.5.4 La bóveda vaída de la cocina del convento	343

6 Bóvedas planas

6.1 Ejemplos anteriores	354
-------------------------------	-----

6.2	La bóveda plana bajo la extinta Torre de Mediodía	356
6.3	La bóveda plana del sotacoro	360
6.4	La bóveda plana del zaguán del convento	366
7 Cúpulas trasdosadas		
7.1	Ejemplos anteriores	374
7.2	Cúpulas trasdosadas en el Monasterio de El Escorial. Cronología de las obras	386
7.3	Las cúpulas de las torres de la iglesia	391
7.3.1	1567 y 1579. Los proyectos de Juan Bautista de Toledo y Juan de Herrera	391
7.3.2	1579. «Condiciones» para la contratación	395
7.3.3	1581. Tasación	396
7.3.4	1759. Levantamiento de José de Heramosilla	397
7.3.5	1988. Levantamiento de Javier Ortega Vidal	399
7.3.6	2002. Levantamiento de Miguel Ángel Alonso Rodríguez	400
7.3.7	Las cúpulas construidas	401
7.3.7.1	Configuración geométrica	401
7.3.7.2	Configuración constructiva	408
7.3.8	Proceso de proyecto	412
7.4	La cúpula principal	415
7.4.1	1567. La idea de Juan Bautista de Toledo	415
7.4.2	1579. La idea de Juan de Herrera según las <i>Estampas</i>	421
7.4.3	1579. Aparición de fisuras en los pilares del crucero	426
7.4.4	1579. «Condiciones» para la contratación	429
7.4.5	1759. Levantamiento de José de Heramosilla	433
7.4.6	1941. Levantamiento de Manuel Lorente Junquera	434
7.4.7	1950. Levantamiento de Anselmo Arenillas Álvarez	435
7.4.8	1988. Levantamiento de Javier Ortega Vidal	436
7.4.9	2001-2002. Levantamiento de Miguel Ángel Alonso Rodríguez	437
7.4.10	Configuración geométrica	438
7.4.11	Cambios respecto al proyecto de Herrera reflejado en las <i>Estampas</i>	453
7.4.12	Configuración constructiva	463
7.4.12.1	Análisis gráfico de estabilidad estructural	480
7.4.12.2	Antecedentes de esta disposición constructiva	485
7.4.13	Aproximación al proceso de proyecto	488
7.5	El templete del Claustro Mayor	491
7.5.1	Documentación gráfica existente	491
7.5.2	Configuración geométrica	492
7.5.3	Configuración constructiva de la cúpula	497
7.6	Comparación de las tres cúpulas	501
Conclusiones		507
Bibliografía		
	Bibliografía completa, por orden alfabético de autores	531
	Bibliografía específica, por orden cronológico	559
	Estudios sobre las bóvedas del Monasterio de El Escorial	559
	Reproducción de documentación gráfica original	562
	Publicación, transcripción o reproducción de documentación escrita original	563
Glosario		567
Apéndices, en formato electrónico		
	Base de datos de noticias documentales	
	Puntos de medición para el levantamiento	

RESUMEN

Esta tesis doctoral intenta aproximarse a las bóvedas de piedra de El Escorial desde el punto de vista de la Historia de la Construcción, para intentar definir y analizar su configuración geométrica y constructiva. El estudio de las bóvedas del edificio evidencia que uno de sus exponentes más conocidos, la famosa bóveda del sotacoro, no es la única empresa de vanguardia que allí se realizó, y seguramente no la más interesante. El despliegue de conocimientos de geometría para trazados de arcos rebajados, la variedad de soluciones de lunetos apuntados y cortes de bóvedas vaídas no recogidos en los textos quinientistas y, fundamentalmente, el diseño de cúpulas trasdosadas sobre tambor, sin precedentes en España, conforman un cuerpo de saber desarrollado específicamente por los artífices de El Escorial. Todo este esfuerzo se encuadra en la empresa, acometida en España y Francia en el siglo XVI, de traducir al lenguaje de la cantería el repertorio renacentista, ejecutado en Italia fundamentalmente en ladrillo. De hecho, noticias documentales del siglo XVII confirman que «los maestros del escurial escribieron un breve tratado», desafortunadamente hoy desaparecido.

Los apoyos o fuentes originales para este trabajo son la documentación escrita y gráfica original conservada y el propio edificio construido. La documentación escrita –contratos, condiciones de ejecución, documentos de pago, correspondencia, Instrucciones reales, inventarios de bienes, testamentos- es abundante, está transcrita, y en ella hay información sobre cronología de la construcción de las bóvedas, artífices implicados o procedimientos constructivos conocidos. La gestión ha sido realizada mediante una base de datos, incorporada en formato electrónico en los apéndices de la tesis.

La documentación gráfica original es, sin embargo, escasa: desapareció en su mayoría en el incendio de 1671, que mantuvo al edificio en llamas durante quince días y destruyó las cubiertas y las trazas y modelos que se guardaban en los desvanes. Otro incendio posterior acaecido en el Alcázar de Madrid en la nochebuena de 1734, seguramente hizo también desaparecer documentación sobre nuestro edificio, pues destruyó el ala occidental, en la que estaba ubicado un importante archivo de trazas, modelos y documentos de obras reales. Las trazas conservadas no se corresponden, en general, con las soluciones realmente ejecutadas, y no tienen información sobre disposiciones constructivas, pero ofrecen valiosos datos sobre estadios previos de proyecto.

Pero es el propio edificio el que constituye la fuente de información original primordial para este trabajo: qué mejor documento que lo que fue realmente construido y ha llegado hasta nosotros. La necesidad de definir con precisión tanto la geometría de las bóvedas como su despiece hizo imprescindible llevar a cabo un levantamiento riguroso mediante una estación total láser. Los puntos medidos ascendieron a 105.000, número pequeño si se compara con las lecturas millonarias que realiza un escáner láser en cuestión de minutos, pero, la precisión de la estación total es mayor y, además permite seleccionar previamente los puntos que se quiere medir: todos tienen un significado especial, ya sean hiladas, juntas, aristas, o secciones meridianas. El archivo informático con todos los puntos de medición está también incluido en formato electrónico en los apéndices de la tesis.

En los casos en los que se conserva documentación gráfica original, ha sido posible plantear, además de las propuestas de configuración geométrica y constructiva, una aproximación al proceso de proyecto, por comparación con lo realmente ejecutado. En este sentido, ha sido especialmente interesante el estudio de la cúpula principal.

Geometría y corte de piedra

La bóveda cilíndrica fue la tipología más frecuentemente utilizada en el Monasterio: en el nivel principal del edificio, sobre un total de 132 capillas o tramos abovedados de cantería, 106 están cubiertas con bóvedas cilíndricas, de los cuales 69 tienen directriz oval rebajada. Los trazados de óvalos utilizados se apartan de los propuestos por los tratadistas y allí se pudo conocer o desarrollar un tipo de trazado para cualquier proporción luz-altura. La elipse no sería más que puntualmente utilizada en piezas pequeñas.

Las bóvedas de arista, esquifadas, rincón de claustro y ochavadas existentes en el Monasterio evidencian el control de nuestros artífices de la manera de rebajar la clave de un arco sin variar la luz, generando una elipse, para resolver las intersecciones de superficies en las bóvedas mencionadas. No podemos determinar si empleaban los métodos propuestos por Durero, Serlio, De l'Orme o Vandelvira, pero el trazado serliano está físicamente materializado en una traza conservada.¹ También se conocía el método para estrechar un arco de medio punto sin reducir la altura de la clave, generando una semi-elipse peraltada, que se basa en los procedimientos anteriormente mencionados para generar arcos rebajados, pero que no sería explícitamente expuesto hasta el manuscrito de Ginés Martínez de Aranda (h. 1600): en este caso la evidencia la constituye el encuentro oblicuo entre dos pequeñas bóvedas de cañón de ancho diferente en los corredores de la iglesia, a la cota de la cornisa principal del templo.²

Es cuestión aceptada de forma general que en el siglo XVI no se conocía el trazado de un óvalo para cualquier proporción luz-altura. Los trazados de óvalos propuestos por los tratadistas quinientistas tienen proporciones fijas entre ejes, es decir, no se adaptan a cualquier relación entre sus dimensiones: entre todos los óvalos medidos en el Monasterio, sólo dos se adaptan a trazados recogidos en dichos textos (figs. 1 y 2). Nuestros artífices encajaban óvalos con pericia en cualquier proporción, superando en este punto las limitaciones aconsejadas por Serlio y especialmente Vandelvira, quien propone sólo un tipo de óvalo, y para todos los demás casos donde haya que construir una figura oval «según te lo pidiera el sitio», un arco elíptico. Esta tesis propone además la posibilidad de que en El Escorial se utilizara un trazado, no conocido en la actualidad, para un óvalo de cualquier proporción luz-altura con centros alineados a 45°. La sólida formación matemática y gráfica de Juan de Herrera da fuerza a la hipótesis, que se desvanece al considerar la nula difusión posterior del trazado.

Las soluciones de apertura de huecos en una bóveda mediante lunetos apuntados, utilizada en España con anterioridad en la cripta del palacio de Carlos V en la Alhambra de Granada, fueron la apuesta definitiva de nuestros artífices. Estos trazados no aparecen en los textos de cantería quinientistas. Los lunetos apuntados escurialenses en cañones de sección semicircular no siguen las directrices que tiempo después recomendaría fray Lorenzo de San Nicolás, quien asignaba al diámetro del hueco la mitad de la luz de la bóveda principal y aconsejaba la disposición de las aristas del luneto formando en planta 45° con los paramentos laterales. El ancho del hueco viene en el Monasterio impuesto en cada caso por condicionantes irrenunciables del proyecto. La posición del vértice, -y en consecuencia el ángulo de las aristas en planta-, resulta de una decisión previa estimativa

1 Alzado para la puerta de la cocina del convento, h. 1565 (Biblioteca del Palacio Real de Madrid).

2 José CALVO LÓPEZ analizó el ejemplo escurialense, relacionándolo con la traza ofrecida por Martínez de Aranda, en «La semielipse peraltada. Arquitectura, geometría y mecánica en las últimas décadas del siglo XVI», en *Actas del Simposium «El Monasterio de El Escorial y la arquitectura»*, Madrid, Ediciones Escurialenses, 2002, pp. 419-435. El autor se apoyaba en los estudios desarrollados para su tesis doctoral, donde señalaba la singularidad de la traza para el arco semi-elíptico peraltado ofrecida por Martínez de Aranda («Cerramientos y trazas de montea» de Ginés Martínez de Aranda, E. T. S. de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid, 1999, p. 488).

El estudio de esta pieza del Monasterio está incluido en el capítulo 4 de esta tesis, sección 4.3.1.1.1.

para el peralte del luneto, indicada en las condiciones para contratar las partidas, y un ajuste fino orientado a mejorar el aparejo, evitando hiladas centrales excesivamente anchas o estrechas.³ La solución adoptada de forma general en el edificio para el corte de piedra de las bóvedas cilíndricas con lunetos supone irrenunciable la premisa del aparejo continuo del conjunto completo y la regularidad de las hiladas de la bóveda, que quedan interrumpidas justo en el encuentro con la arista del luneto: de dichos puntos parten las juntas de éste, que son trazadas de forma que mantengan paralelismo en planta. En cuanto al trazado de las aristas, en el zaguán del convento llegaron incluso a incluir en ellas un quiebro, formándose cada una por la sección de la bóveda por dos planos verticales diferentes. La flexibilidad del trazado del luneto apuntado reside no sólo en la posición variable del vértice y las aristas, sino en la posibilidad de incluir cualquier arco como directriz del hueco: en El Escorial se emplearon, en la bóveda anteriormente mencionada, arcos apuntados y un *falso óvalo*. La radical preferencia que mostraron los artífices del edificio por la solución de lunetos apuntados frente a cilíndricos tuvo seguramente en la flexibilidad del trazado su mejor argumento.

Lunetos cilíndricos de pequeño tamaño fueron construidos en varios puntos del Monasterio de El Escorial. Sin embargo, su utilización en piezas grandes sólo se acometió en la bodega bajo la cocina del colegio, hacia 1580. La escasez de ejemplos de este tipo de lunetos en el edificio indica que se trataba de una solución que no contaba con el beneplácito de sus artífices. No sabemos si rechazaban la configuración formal del modelo o la complejidad de aparejarlo en piedra de forma continua, pero parece claro que evitaron su construcción.

Los cortes de las bóvedas vaídas del Monasterio disponen las hiladas redondas, ovales, cuadradas, cuadradas en arista y cuadradas en damero. Los textos de cantería quinientistas no recogen los despieces por hiladas cuadradas en arista y damero, y tampoco por hiladas ovales en una bóveda de traza esférica (fig. 1). Todas las bóvedas vaídas del convento -porción meridional del edificio-, realizadas bajo la responsabilidad de los aparejadores Lucas de Escalante y Pedro de Tolosa antes de 1576, se construyeron por hiladas cuadradas, salvo una bovedita de los sótanos que se cortó por hiladas redondas. En la zona de sótanos del convento, en el panteón de infantes, se realizaron bóvedas vaídas escarzanas muy rebajadas, de 8,40 m de luz, con una variedad poco frecuente de corte por hiladas cuadradas: despiece en arista. Las hiladas aparentes en este caso son también cortes de la bóveda por planos verticales, y los lechos conos de eje horizontal, pero la disposición en planta imita la de una bóveda de arista. El resto de las bóvedas vaídas del edificio, construidas después de 1576 ya bajo la dirección del aparejador Juan de Minjares, se construyeron con despieces por hiladas redondas, incluyendo un sorprendente trazado oval en una pequeña bóveda vaída de planta rectangular en la iglesia (fig. 2).

Esta segunda etapa de bóvedas vaídas en el edificio optó siempre por pilares de apoyo achaflanados en los ángulos de la planta, lo que supone que las *pechinas* de arranque de la bóveda no nacen de un vértice sino de un arco de circunferencia. Esta configuración, utilizada en Santa María de Carignano en Génova y San Pedro en Roma, se repetiría en el de la iglesia escurialense y en las *pechinas* de la bóveda plana del sotacoro.

La preferencia manifiesta por los cortes por hiladas cuadradas para bóvedas vaídas ha de tener una justificación, y no sólo que Pedro de Tolosa fuera un experto en

³ Como toda regla, ésta también tiene una excepción. Los lunetos de la bóveda del pórtico de la iglesia tienen una hilada central excesivamente ancha. La corrección que se podía haber efectuado desplazando el vértice hacia la clave de la bóveda principal fue quizá desechada porque el luneto habría *engullido* una porción demasiado grande de dicha bóveda.

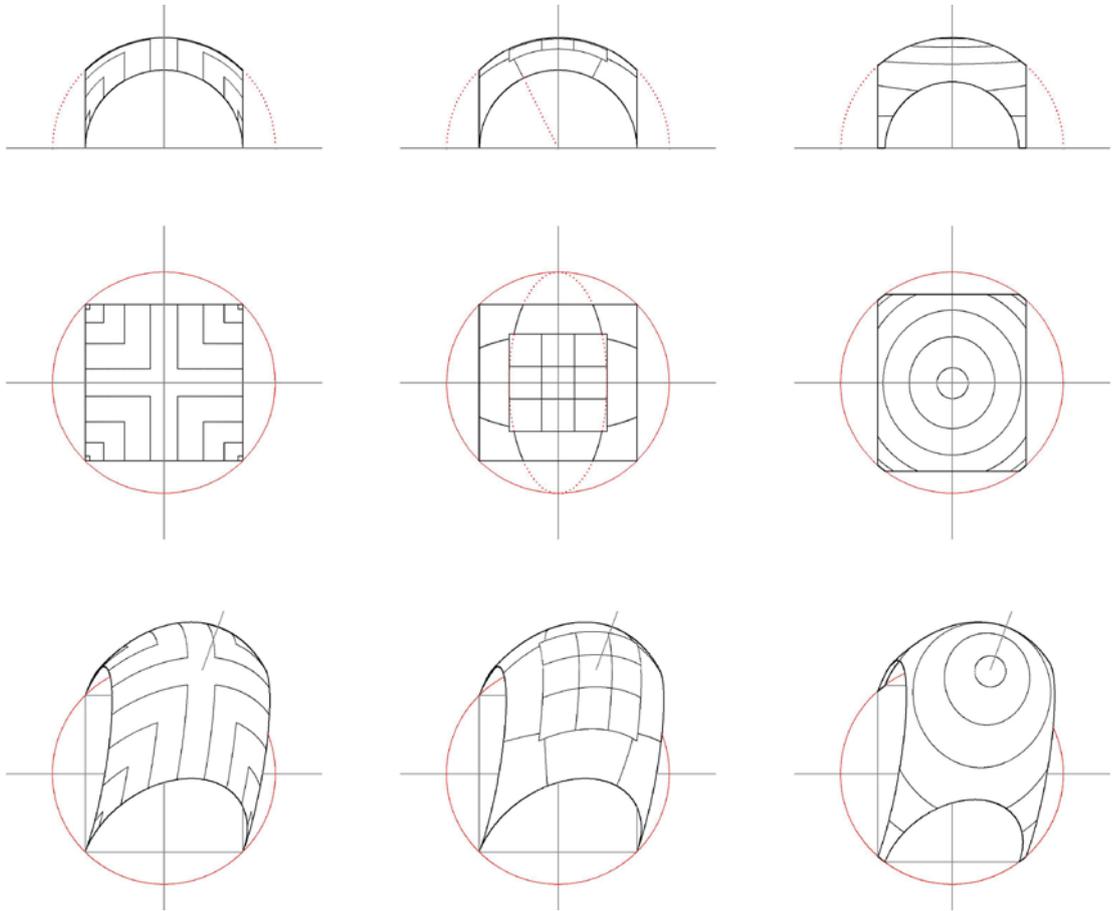


Fig. 1

Cortes de bóvedas vaídas construidos en el Monasterio de El Escorial, no recogidos por los textos de cantería quinientistas.

El dibujo muestra alzado, planta y axonometría de cada ejemplo. A la izquierda, bóveda vaída cortada por hiladas cuadradas en arista; en el centro, despiece en damero, y a la derecha, hiladas de planta oval.

Obsérvese que, en el tercer caso, las hiladas de planta oval en una bóveda de traza esférica resultan alabeadas en el espacio, cuestión claramente apreciable en el alzado.

su construcción. Este tipo de configuración no parece una solución alcanzada tras largo

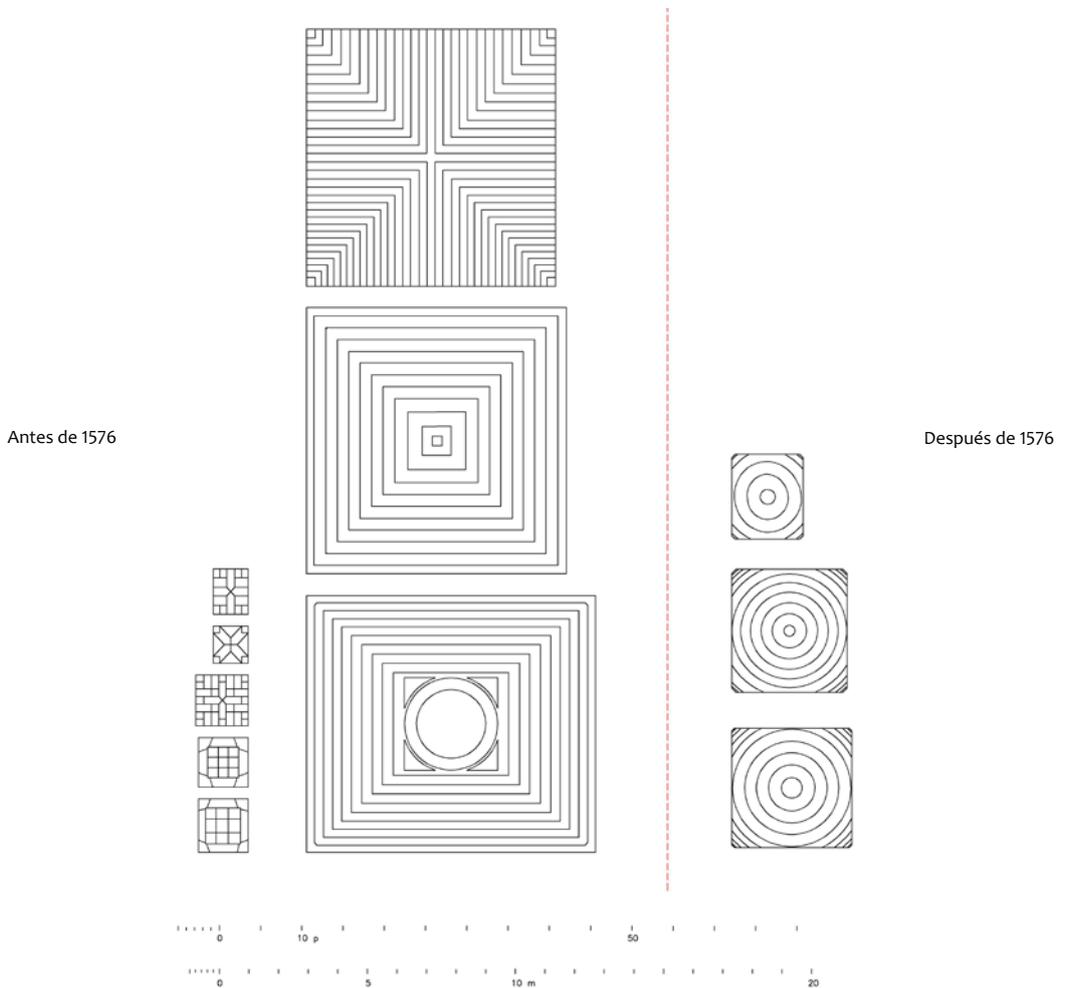


Fig. 2

A la izquierda de la línea roja, cortes de bóvedas vaídas realizados antes de 1576, bajo la dirección de los aparejadores Pedro de Tolosa y Lucas de Escalante.

A la derecha, cortes de bóvedas vaídas realizados después de 1576 bajo la dirección del aparejador Juan de Minjares.

tiempo de evolución y experimentación; más bien surge de forma temprana asociada con frecuencia a condiciones de borde irregulares. En este punto, conviene recordar que el segundo ejemplo más antiguo de bóvedas vaídas de cantería, las dos construidas en el teatro de Philippopolis en el siglo III, presentan cortes por hiladas cuadradas y un perímetro irregular (fig. 3). Es el caso de la bóveda vaída de la cocina del convento, en la que los arcos de apoyo de la bóveda vaída son circulares, pero dos de ellos están peraltados, alterando la geometría de la bóveda, que no es estrictamente esférica. Un despiece por cortes horizontales habría producido hiladas no circulares, *estiradas* en una dirección; una solución de cortes perfectamente circulares en planta habría producido alabeos en cada hilada, como ocurre en la pequeña bóveda vaída de la capilla NO de la iglesia, en la que sobre una superficie perfectamente esférica se cortaron hiladas ovales en planta, que se perciben claramente alabeadas. Todas las bóvedas descritas que no se ajustan a una superficie esférica por unas condiciones de borde peculiares se han denominado *pseudo* vaídas en este trabajo, con exponentes en casi todas las bóvedas vaídas del nivel principal del convento: cocina, iglesia de *prestado*, bóvedas bajo la escalera principal y boveditas de las escaleras junto al Claustro Mayor. El análisis de las bóvedas de la iglesia de *prestado* es crucial en esta argumentación: las condiciones describen una construcción por hiladas cuadradas de cantería labradas a picón -más tosco-, viable sólo en un espacio importante y de techos bajos si se pensaba enlucir, como lo vemos en la actualidad. La solución de despiece habría sido elegida no por su apariencia, sino por la eficacia de la solución.

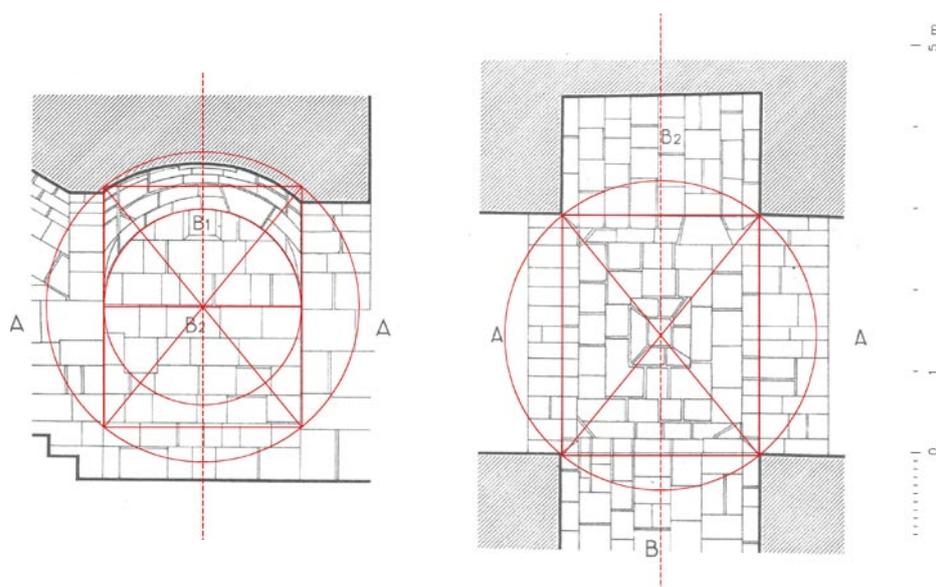


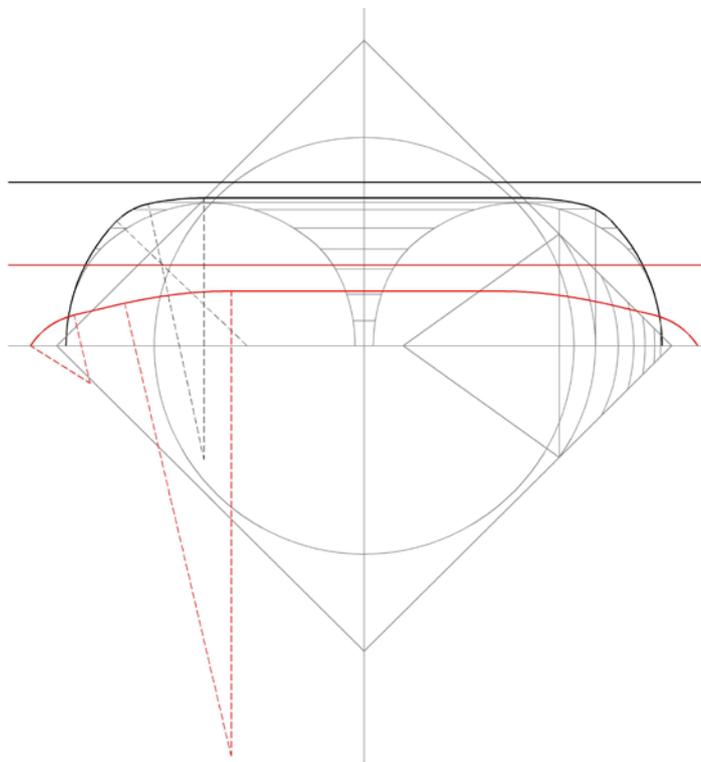
Fig. 3

Bóveda vaída en el teatro de Philippopolis (Shuhba, Siria). Trazados realizados en color rojo sobre el levantamiento de P. Coupel (1956, Pl. IX, fig. 1 y 2).

Obsérvese en la sección, a la izquierda, la desigualdad de altura de las claves de los arcos laterales.

Este trabajo sólo ha encontrado dos bóvedas planas de sillería sin nervadura anteriores a El Escorial: la bóveda etrusca de la prisión Mamertina en Roma y la bóveda del Crac de los Caballeros en Siria, ambas carentes de precisión y despliegue de conocimientos geométricos y constructivos. La investigación desarrollada para este trabajo confirma la tesis de otros autores sobre la primera bóveda plana que se construyó en El Escorial en los sótanos meridionales a finales de 1568: la estructura formada por un pilar y cuatro arcos que hoy soportan la bóveda no eran originales. La flecha de la bóveda en la zona central y los desajustes de replanteo de hiladas de uno de los cuadrantes podrían ser la evidencia de un colapso parcial. Tras el primer intento fallido, Juan de Herrera y Juan de Minjares habrían encontrado la solución al problema en 1583 en el sotacoro, sobre una planta de dimensiones parecidas (7,80x7,80m frente a 8,35x8,63m): menos espesor, más

peralte de la sección diagonal, y menor número de hiladas. La parte más compleja se concentra en las pechinas, formadas por hiladas de arcos horizontales que se apoyan en la sección diagonal y en los arcos perimetrales, de diseño oval prefijado: las hiladas así formadas no resultan concéntricas, obteniéndose, en la transición entre pechinas y zona central, una hilada de ancho variable apreciable a simple vista.



1568

1583

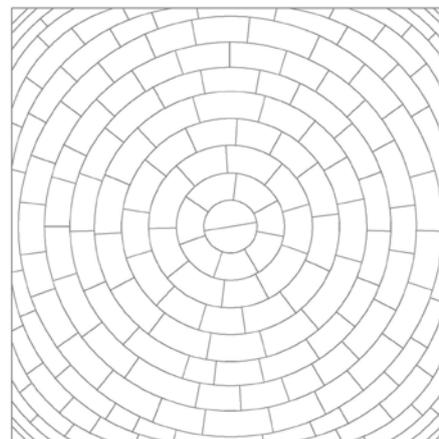
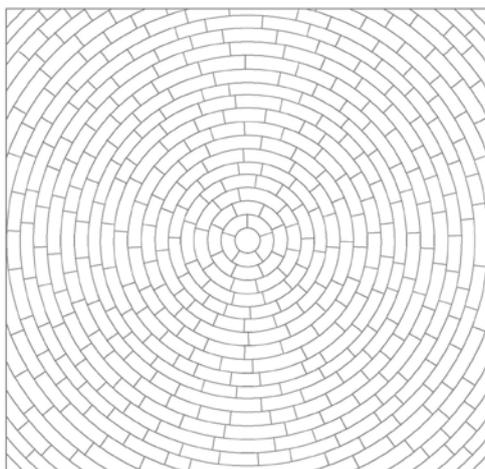


Fig. 4

Arriba, planta y sección diagonal de la bóveda del sotacoro (1583). En color rojo, superpuesta a la misma escala y al mismo nivel de imposta, la sección diagonal de la bóveda plana en los sótanos meridionales (1568). Abajo, plantas de las dos bóvedas planas.



Sobre el corte de piedra de cúpulas trasdosadas no existía apoyo de documentación escrita ni construida que pudiera servir de referencia. Sólo se ha encontrado un posible precedente, al menos del planteamiento de un problema parecido, en las trazas de Gaspar de Arce para la torre de la catedral de Lugo, realizadas entre 1570 y 1575. La cúpula es parcialmente trasdosada, de espesor variable y doble hoja de cantería y está rematada con linterna. La traza de la sección contiene una descripción gráfica completa del despiece de la torre, y constituye uno de los escasos ejemplos en que un dibujo de

construcción del siglo XVI llega hasta nosotros. No hay más coincidencias con las cúpulas escorialenses, que no tienen medidas ni proporciones similares ni solape de las piezas del trasdós tallado en cada dovela.

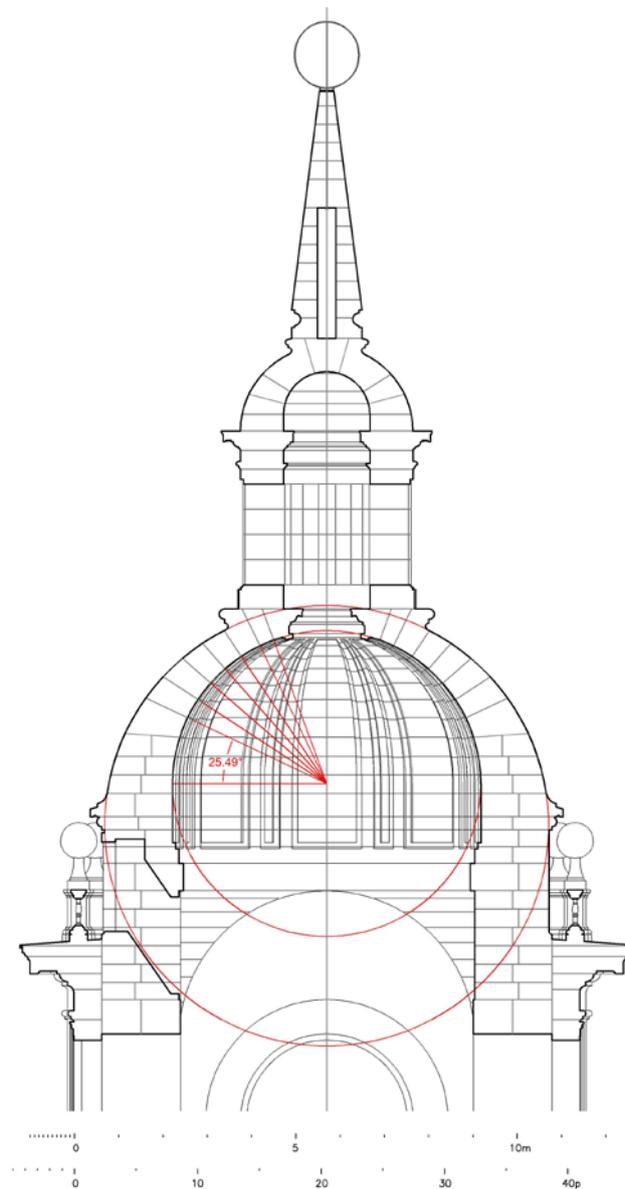


Fig. 5

Configuración constructiva de las cúpulas de las torres de la iglesia del Monasterio de El Escorial.

En el Monasterio se construyeron cuatro cúpulas trasdosadas, de tres tamaños diferentes. Las dos cúpulas de las torres de la iglesia, de 6,68 m de diámetro, se terminaban en diciembre de 1581; la cúpula principal, sobre el crucero del templo, con 18,77 m de luz, en junio de 1582 y, finalmente, en 1588 se concluía el templete del Claustro Mayor. Todas ellas son de directriz esférica, están construidas en piedra, sobre tambor y poseen linterna de remate. Este estudio ha logrado proponer una configuración constructiva para la cúpula principal de la iglesia y las de sus torres. La hipótesis sobre la disposición interna de lechos de las dovelas de la cúpula del templete, sin embargo, no tiene el mismo nivel de certeza, porque el revestimiento interno de mármol impide analizar el despiece del intradós.

La configuración idónea para una cúpula de media naranja, desde el punto de vista estructural, dispone los lechos según conos invertidos con vértice en el centro del intradós, requiriéndose cimbra para el asentamiento de la totalidad de las dovelas. La solución adoptada en las cúpulas escorialenses es diferente: la primera parte está construida por

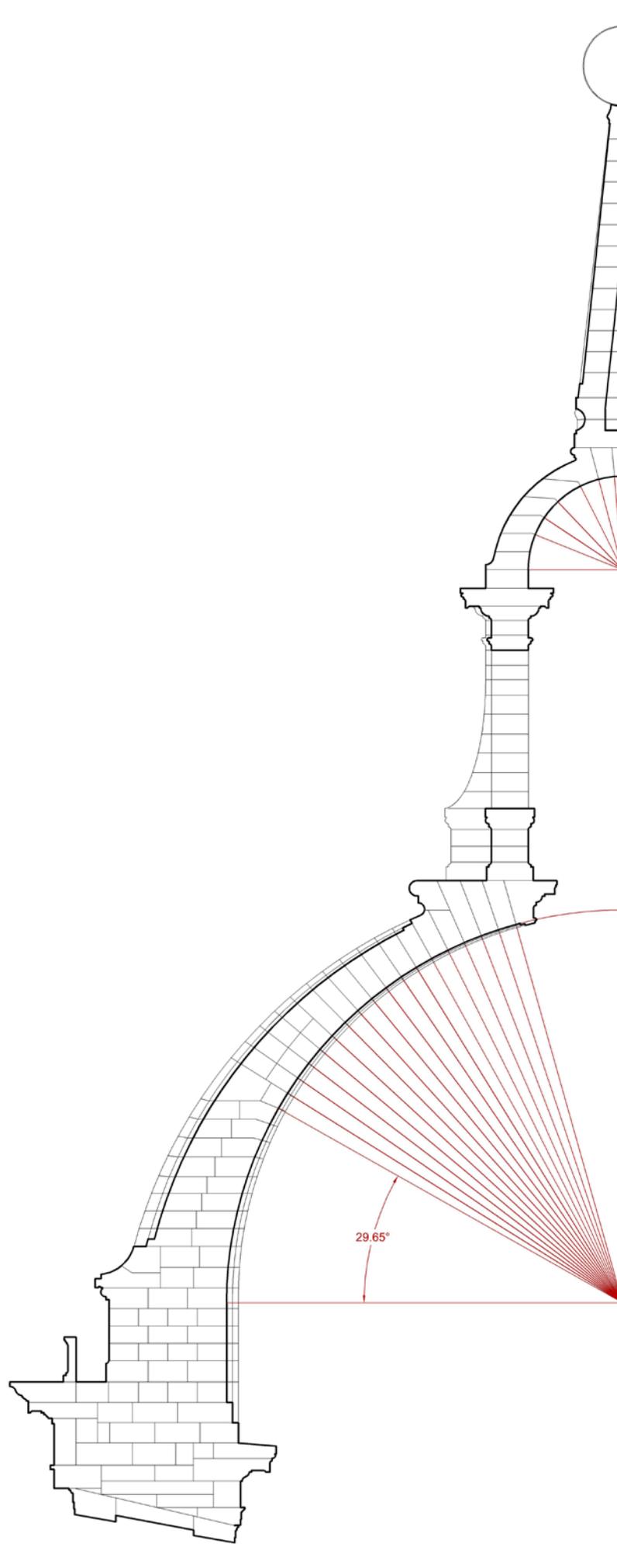


Fig. 6
Configuración constructiva
de la media naranja de la
cúpula principal y su linterna.



lechos horizontales, al modo de los jarjamentos góticos, sin necesidad de cimbras, por vuelo sucesivo de las piezas, hasta un ángulo de casi 30° en la cúpula principal y 25° en la de las torres. A partir de ese punto, y ya con cimbra, se completa la construcción por lechos radiales, tras disponer una hilada más alta de transición entre los dos sistemas constructivos (figs. 5 y 6).

La hilada alta de paso de lechos horizontales a radiales tiene una sencilla explicación geométrica en el caso de las cúpulas de las torres: si en el trasdós la altura de la hilada fuera similar al resto, en el interior resultaría demasiado estrecha. En la cúpula principal, sin embargo, la existencia de doble hoja en la hilada de transición anula la validez del argumento anterior, porque se podrían haber dispuesto dos hiladas de tamaño normal en la parte externa y una en la interna. El análisis gráfico de estabilidad estructural de la cúpula principal revela la existencia de ángulos comprometidos entre la resultante de esfuerzos y la dirección normal a los lechos en tres puntos: los lechos inferiores de la hilada alta y los dos inmediatamente anteriores. De alguna forma conscientes de este problema, nuestros artífices habrían diseñado una hilada de piezas grandes, y lechos acodados en las dos anteriores para evitar deslizamientos. Quizá la hilada alta es también fruto de la necesidad de estabilizar el último lecho *horizontal* en el propio proceso de asentamiento, antes de completarse la hilada, evitando el desplazamiento hacia dentro de las dovelas de la cara interna. Otra de las razones que pudo aconsejar la disposición de lechos acodados en la media naranja de la cúpula principal, por debajo de la hilada alta, es evitar la aparición en el intradós de una hilada demasiado estrecha en el cambio de lechos horizontales a radiales.

El cupulín de la linterna de la cúpula principal está construido por lechos horizontales casi en su totalidad, incluyendo el bocel de base de la aguja. En este caso, la reducción de cimbra en una estructura de 4,47 m de diámetro no parece un factor determinante de proyecto, y quizá se utilizaron lechos horizontales hasta arriba para reducir la entrada de agua de lluvia,⁴ acodándose los lechos por el interior para impedir el deslizamiento.

A pesar de que algunos autores consideran la estereotomía de la cúpula principal escurialense casi un problema de albañilería por el pequeño tamaño del dovelaje respecto al conjunto, su valor no está en el virtuosismo de la talla, sino en la propuesta de una solución adecuada mecánicamente y viable constructivamente con ahorro de cimbra, para una cúpula de piedra maciza sobre tambor trasdosada, tipología inexistente en nuestro país en ese momento. En este sentido, habría que recordar que las condiciones para contratar la cúpula indicaban un tipo de labra a escoda para los resaltos interiores, y a picón, más tosco, para los paños de intradós situados entre ellos. Esta diferenciación de acabados sugiere la posibilidad una idea inicial de un revestimiento interior de pintura al fresco en los «hondos», que no habría llegado a materializarse, y que encajaría con un troceado en piezas más pequeñas.⁵

Es sabido que el manuscrito de Vandelvira (h. 1575-1591) circuló en el entorno de la obra de El Escorial, pues su autor reclamaba en 1596 un ejemplar que había cedido a Juan de Valencia, quien había sido contratado en 1563 junto con Juan de Herrera como ayudante de Juan Bautista de Toledo en el estudio de Madrid. Juan de Valencia había fallecido en

4 Sugerencia de Luis Pérez de Prada, arquitecto de Patrimonio Nacional a cargo de las obras de restauración de la cúpula.

5 Pedro Navascués, Clausura del curso «La piedra en el patrimonio arquitectónico. Criterios de conservación y restauración», organizado por el Instituto de Patrimonio Histórico Español, julio de 2006.

1591, luego antes de esa fecha el manuscrito estaba redactado.⁶ Muchos de los cortes que describe Vandelvira se encuentran materializados en el Monasterio de El Escorial: bóvedas vaídas por hiladas redondas y cuadradas, bóvedas de arista y esquivadas o descendas de cava. Las directrices de los cañones que forman una bóveda de arista rebajada que se construyó en los sótanos bajo la fachada principal hacia 1568, encajan con el trazado oval propuesto por Vandelvira. Sin embargo, la mitad sur del edificio y parte de la cabecera se construyeron antes de 1576, luego allí no pudo ser consultado el manuscrito. Por otro lado, los cortes de lunetos apuntados, bóvedas vaídas con despiece en arista y damero, bóvedas planas y diseño constructivo de cúpulas, no son trazas recogidas por Vandelvira. El manuscrito no alude a criterios de diseño de la sección, dimensionado del espesor o variantes de disposiciones de lechos en bóvedas y cúpulas, cuestión crucial para su viabilidad estructural. En este sentido, el manuscrito de Hernán Ruiz ofrece multitud de secciones completas de cúpulas y bóvedas vaídas. Redactado hacia 1558-60, no hay noticias explícitas de su conocimiento por parte de los artífices de la obra de El Escorial. Este trabajo ha encontrado, sin embargo, un posible rastro del trabajo de Hernán Ruiz en las bóvedas escorialenses: la directriz oval de las bóvedas de cañón del sotacoro y arcos perimetrales de apoyo de la bóveda plana, encaja con el trazado original del arquitecto andaluz.

Tradicionalmente se ha considerado que la estereotomía gótica se apoyaba en una definición previa de líneas en el espacio (arcos), con una disposición menos controlada de las superficies intermedias (plementería), mientras que la estereotomía renacentista surgía de una concepción previa de las superficies. Sin embargo, algunos aspectos de la construcción de las bóvedas de cantería escorialenses sugieren un apoyo casi exclusivo en una geometría predefinida de líneas en el espacio, que no conforman superficies conocidas. Los lunetos apuntados surgen de un diseño previo del arco del paramento y las secciones verticales de la bóveda principal, pero el propio luneto está formado por una superficie reglada alabeada, de naturaleza más extraña, íntimamente ligada a la configuración de su aparejo. La proliferación de bóvedas pseudo vaídas, imposibles de clasificar desde el punto de vista de la geometría de su intradós, se explica también por la necesidad de apoyarse en bordes irregulares o secciones principales impuestas por condicionantes de proyecto, y otra vez impera el control de la línea frente al de la superficie. El intradós de las pechinas del sotacoro tampoco encaja con una superficie predefinida: se trata de arcos de circunferencia horizontales que se apoyan en los arcos carpanel perimetrales y en el de la sección diagonal, condicionantes previos del proyecto.

La mayor flexibilidad del diseño de bóvedas góticas sería quizá una de las razones de la pervivencia en el tiempo de esa tradición constructiva. Los constructores renacentistas hubieron de buscar soluciones para adaptar su repertorio de superficies canónicas a condiciones de borde diferentes. La bóveda vaída sería uno de los recursos más potentes, por su capacidad de cubrir cualquier planta poligonal.

6 Geneviève BARBÉ-COQUELIN DE LISLE, *El tratado de arquitectura de Alonso de Vandelvira*, edición con introducción, notas, transcripción del texto, facsímil y glosario hispano-francés de arquitectura, Albacete, Caja de Ahorros Provincial de Albacete, 1977, vol. 1, p. 19. Otros autores cierran un poco más la horquilla temporal de probable redacción del manuscrito: José Calvo López propone 1578-1589, apoyándose en datos ofrecidos por la propia autora francesa (tesis doctoral inédita «Cerramientos y trazas de monea» de Ginés Martínez de Aranda', E. T. S. de Arquitectura de Madrid, 1999, p. 81).

Geometría y diseño estructural de cúpulas

La existencia en El Escorial de cúpulas trasdosadas en piedra y la escasa incidencia de esta tipología en construcciones anteriores fue uno de los primeros focos de interés de este estudio. La cúpula escorialense es pequeña comparada con las italianas o bizantinas, pero constituye, junto con la capilla del castillo de Anet, uno de los escasos ejemplos que se pueden encontrar en el siglo XVI de cúpulas trasdosadas y de piedra maciza.⁷ Con anterioridad, los cimborrios de las catedrales de Angulema, Zamora y Salamanca en el siglo XII, y los de la colegiata de Toro y la sala capitular de la catedral de Plasencia en el XIII, son también exponentes de cúpulas trasdosadas de cantería sobre tambor y claros precedentes de una tipología que luego consolidaría el Renacimiento. Sin embargo, el perfil apuntado y la configuración en hojas independientes de Angulema, Salamanca y Plasencia, y el intradós gallonado y nervado de todas ellas salvo la cúpula francesa, distancian estos ejemplos de las rigurosamente clasicistas cúpulas escorialenses.

El diseño estructural tenía en el siglo XVI un fundamento empírico, por repetición de reglas extraídas de modelos reales, que en este caso no podían ser buscadas en ejemplos españoles. Juan Bautista de Toledo, que había trabajado dos años como segundo arquitecto de San Pedro a las órdenes de Miguel Ángel, había fallecido doce años antes del inicio de los trabajos en la cúpula: el reto para los que abordaron su diseño y construcción debió de ser grande, pues no contaban con experiencia previa ni ejemplos cercanos para estudiar. El problema estructural más característico de una cúpula es que, al emerger por encima del resto de la edificación, carece de contrarresto para el empuje. La estabilidad es, entonces, un problema que sólo el adecuado proyecto de la sección puede resolver. Los diseños de cúpulas de la Antigüedad y el Renacimiento, difundidos a través de los tratadistas clásicos, tendrían un papel importante en el proceso, no sólo como referentes arquitectónicos a emular, sino como pautas de diseño estructural. No sabemos con qué criterios se enfrentaba un arquitecto en el siglo XVI al proyecto de una cúpula. Conocido un ejemplo supuestamente viable, no sabemos si se copiaban sus proporciones, sus medidas reales, o si se tenía en cuenta el tipo de material. La maqueta de la cúpula de la catedral de Florencia que construyó Brunelleschi tenía entre 6 y 7 m de luz, y quizá su objetivo no fue sólo mostrar claramente la idea, el aparejo y la manera de construir sin cimbra, sino comprobar el comportamiento de la estructura en un tamaño reducido. En el contexto del estudio del diseño estructural de cúpulas en el siglo XVI, el Monasterio de El Escorial supone un caso muy singular, pues un mismo edificio alberga tres cúpulas del mismo tipo y diferente tamaño, por lo que supone un campo de investigación inigualable para analizar las premisas de diseño que se consideró oportuno respetar. Valorado previamente el interés intrínseco del estudio, la pertinencia de su realización se ve además acrecentada por la posibilidad que ofrece una cúpula trasdosada de analizar también su cara externa: un levantamiento preciso en el que interior y exterior estén relacionados permite realizar una hipótesis de configuración geométrica y constructiva. Este trabajo, apoyándose en el levantamiento expresamente desarrollado y en el análisis de la documentación original conservada, propone una aproximación al proyecto de la cúpula principal de la iglesia y las de sus torres.

La Sección C es la traza más antigua conservada y, aunque sin unanimidad, su autoría atribuida a Juan Bautista de Toledo. Comparando el dibujo con la documentación

⁷ La cúpula de la capilla del castillo de Anet, construida por Philibert de l'Orme entre 1547 y 1552, es una estructura maciza de sillería de 8,17 m de luz.

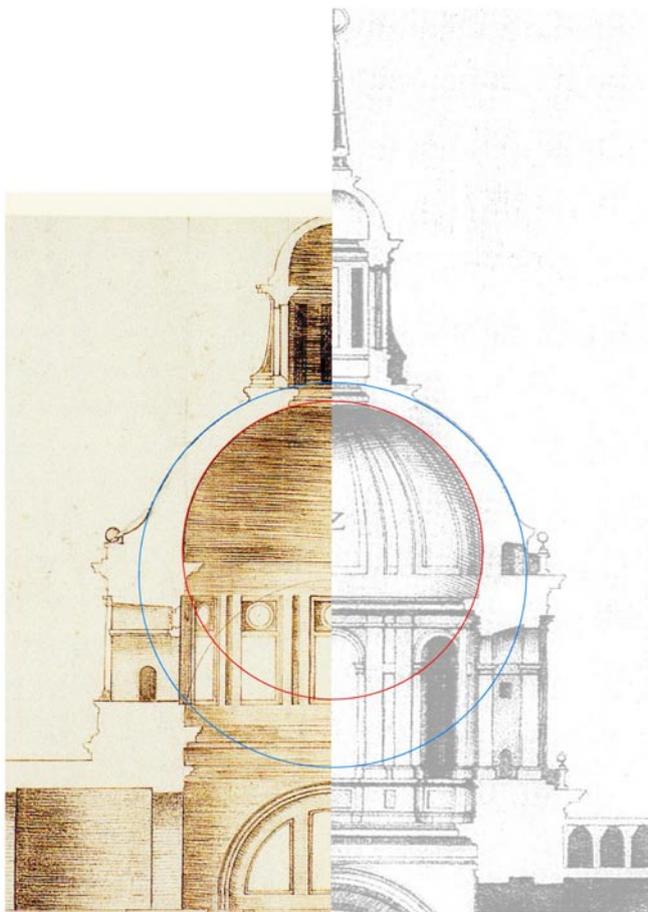
Fig. 7

Comparación proporcional entre dos estadios de proyecto de la cúpula de la iglesia escurialense.

A la izquierda el dibujo conocido como Sección C (1564-1567) de Juan Bautista de Toledo.

A la derecha el proyecto de Herrera que refleja el «Quinto Diseño» de las *Estampas*.

Los dibujos no están a la misma escala; se han relacionado haciendo coincidir centro y radio de las esferas de intradós.



gráfica que probablemente manejó el arquitecto en España, sólo existen coincidencias con el proyecto de Bramante para San Pedro dibujado por Serlio: las dimensiones reales de los espesores del tambor y la media naranja en la zona cercana a la linterna son muy parecidas. El proyecto de Juan de Herrera para la cúpula antes de 1579, reflejado en las *Estampas*, asignaría al espesor del tambor $1/7$ de la luz, relación que muestra el Panteón de Roma en el dibujo de Serlio, y reproduciría exactamente las proporciones del diseño de la media naranja de la Sección C (fig. 7). Después, ante la alarma por las fisuras aparecidas en los pilares torales al iniciarse la construcción de la cúpula, se decidió reducir el peso del cimborrio: se disminuyó la altura del tambor y la linterna y, fundamentalmente, el espesor de la calota, que resultaría lo más eficaz para el fin propuesto. En este punto estaríamos ante el proyecto definitivamente ejecutado.

Las pocas evidencias que poseemos del desarrollo de la obra de las cúpulas de las torres de la iglesia nos hablan de un proceso complejo jalonado de dudas e indecisiones. La traza inicial de la sección de la cúpula, propuesta por este trabajo, tenía unas proporciones similares a la cúpula principal, que habría sido entonces el punto de partida. Algo aconsejó después un cambio radical, aumentándose el espesor, el diámetro de la linterna y suprimiéndose los resaltos exteriores (fig. 8). Sin embargo, sí se construyeron resaltos interiores, que son sólo apreciables desde el interior del cuerpo de campanas. Por otro lado, la construcción por lechos horizontales en la parte inferior de la media naranja, como en la cúpula principal, no se justifica por un ahorro de cimbra en una estructura pequeña. Estas evidencias apuntan a que, en cuanto a disposición de cortes de cantería y formalización de resaltos, las torres pudieron ser de alguna manera modelos o maquetas del cimborrio a escala casi $1:3$ y en ellas se ensayaron configuraciones constructivas y formales realmente nuevas que con gran inmediatez se iban a poner en práctica en la cúpula principal.

Muchas preguntas quedan aún sin contestar: comparando la cúpula principal, la de las torres y la del templete, ¿por qué una estructura más pequeña se proyectaba proporcionalmente más gruesa? ¿Por qué se aumentó el diámetro de la linterna y el espesor de la cúpula de la torre respecto al proyecto inicial de Herrera?



Fig. 8

A la izquierda, alzado de Herrera para la cúpula de las torres (h. 1579). Señalada en rojo la sección propuesta por este trabajo para ese momento del proyecto. A la derecha, alzado y sección de la cúpula construida.

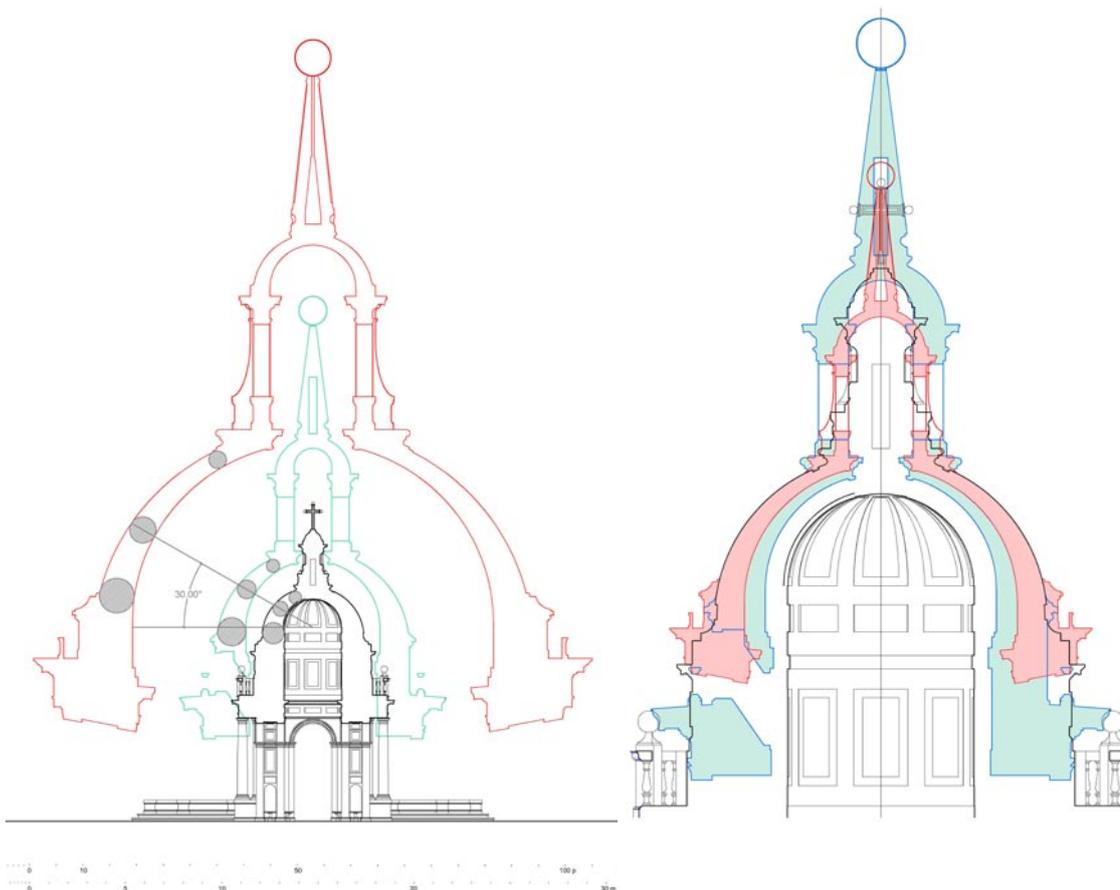


Fig. 9

A la izquierda, comparación de las cúpulas de la iglesia (rojo), sus torres (azul) y templete, a la misma escala. Los círculos de color gris pretenden hacer patente la existencia de dimensiones parecidas, aunque no iguales, en las tres cúpulas. A la derecha, comparación de proporciones entre las tres cúpulas, haciendo coincidir centro y radio de trasdós.

Artífices

La figura de Juan Bautista de Toledo podría constituir un eslabón intermedio entre el maestro mayor de origen medieval, al tanto del día a día de la obra, con experiencia en el oficio en el que se había formado desde la juventud, y el arquitecto renacentista, con una sólida formación teórica, ejerciendo un control menos directo sobre un mayor número de obras. Fue decisión de Felipe II que Juan Bautista ostentara tanto el cargo de arquitecto real, «y que como tal nos hayais de servir y sirvais en hacer las trazas y modelos que os mandáremos, y en todas nuestras obras, edificios y otras cosas dependientes del dicho oficio de arquitecto», como el de maestro mayor de las obras de El Escorial, el Alcázar, El Pardo y la Casa de Campo. La imposibilidad de abarcar ambas funciones explicaría tanto las frecuentes quejas de la Congregación de la obra sobre sus ausencias, como su conocido mal carácter, cuestión en la que tuvieron también que influir las tribulaciones de su vida personal. Por otro lado, las noticias conservadas esbozan el perfil de un arquitecto al que gustaba hacer personalmente en obra todas las comprobaciones.

Juan de Herrera no tenía experiencia en proyecto y construcción de cúpulas cuando se enfrentó al reto escorialense y lo hizo apoyándose, en cuanto a diseño estructural, en el proyecto de su maestro. Después, en la catedral de Valladolid evitaría el diseño de una cúpula, proyectando en el crucero una sorprendente bóveda vaída ciega. Herrera encarna la figura del arquitecto renacentista y enlaza con las características de algunos de los artífices de los mejores ejemplos de bóvedas construidas a lo largo de la Historia, que no tenían gran experiencia en el oficio de la arquitectura: Tralles y Mileto y el propio Brunelleschi, quien fue denunciado en pleno proceso de construcción de la cúpula por no contar con la debida acreditación en el gremio de canteros de Florencia.

Es reconocida de forma general la huella de los libros de Serlio en diversos aspectos de la obra de El Escorial. Este trabajo ofrece más argumentos de refuerzo, señalando posibles conexiones del proyecto de la cúpula principal con la documentación gráfica publicada por Serlio sobre el Panteón de Roma y la versión de Bramante para San Pedro.

Las soluciones del corte de piedra para las bóvedas eran responsabilidad de los aparejadores: hacían trazas de detalle, modelos de despiezos, instrumentos de comprobación de labra (baiveles, saltarreglas, escuadras, cintreles...) y está documentada la existencia de una *casa de la traza*. Ellos redactaban y firmaban las condiciones para contratar las partidas, cosa que Juan Bautista hizo en una ocasión y Herrera nunca. La completa formación clásica y de oficio de Juan Bautista de Toledo, y su empeño en controlar todos los niveles del desarrollo de la obra, induce a pensar que su batuta llegó hasta las decisiones de cortes de cantería. El período transcurrido entre el fallecimiento de Juan Bautista y la definitiva asunción de Herrera del mando de la obra, habría posibilitado el incremento de poder de los aparejadores, ampliando sus atribuciones hasta el diseño general de los abovedamientos, cuestión que el primer arquitecto escorialense no habría permitido jamás. Los aparejadores controlaban el día a día de la ejecución, desde el replanteo o elección hasta la tasación de lo ejecutado: su actividad resultaba crucial y las Instrucciones Reales para el gobierno de la obra contienen abundantes precisiones sobre sus atribuciones. La documentación conservada no recoge quejas sobre la actividad desarrollada por Lucas de Escalante, los documentos por él firmados son de una cuidada y precisa redacción y su obra más importante en el Monasterio, el Claustro Mayor, es de factura impecable. Sin embargo, el aprecio de Felipe II por la figura profesional de ambos aparejadores no era el mismo, a juzgar por la decisión real de agraviar a Escalante con un destino post-escorialense de menor categoría y retribución.

Aportaciones originales

Sintetizando el contenido anteriormente expuesto, se enumeran a continuación las aportaciones originales que esta tesis ha logrado alcanzar.

- Este trabajo es la primera monografía sobre las bóvedas de piedra del Monasterio de El Escorial. El estudio ha abordado en primera instancia la descripción general de los abovedamientos de cantería y su localización en el edificio. El análisis pormenorizado ha permitido determinar la configuración geométrica y constructiva de las bóvedas más significativas, sobre lo que no existe documentación original.
- El desarrollo del trabajo demandó pronto la elaboración de documentación gráfica general sobre la planta de sótanos, no existente hasta el momento, que se realizó en colaboración con Miguel Ángel Alonso Rodríguez. Esta planta constituye el primer documento que ofrece una descripción general completa de este nivel del edificio (-18 pies).

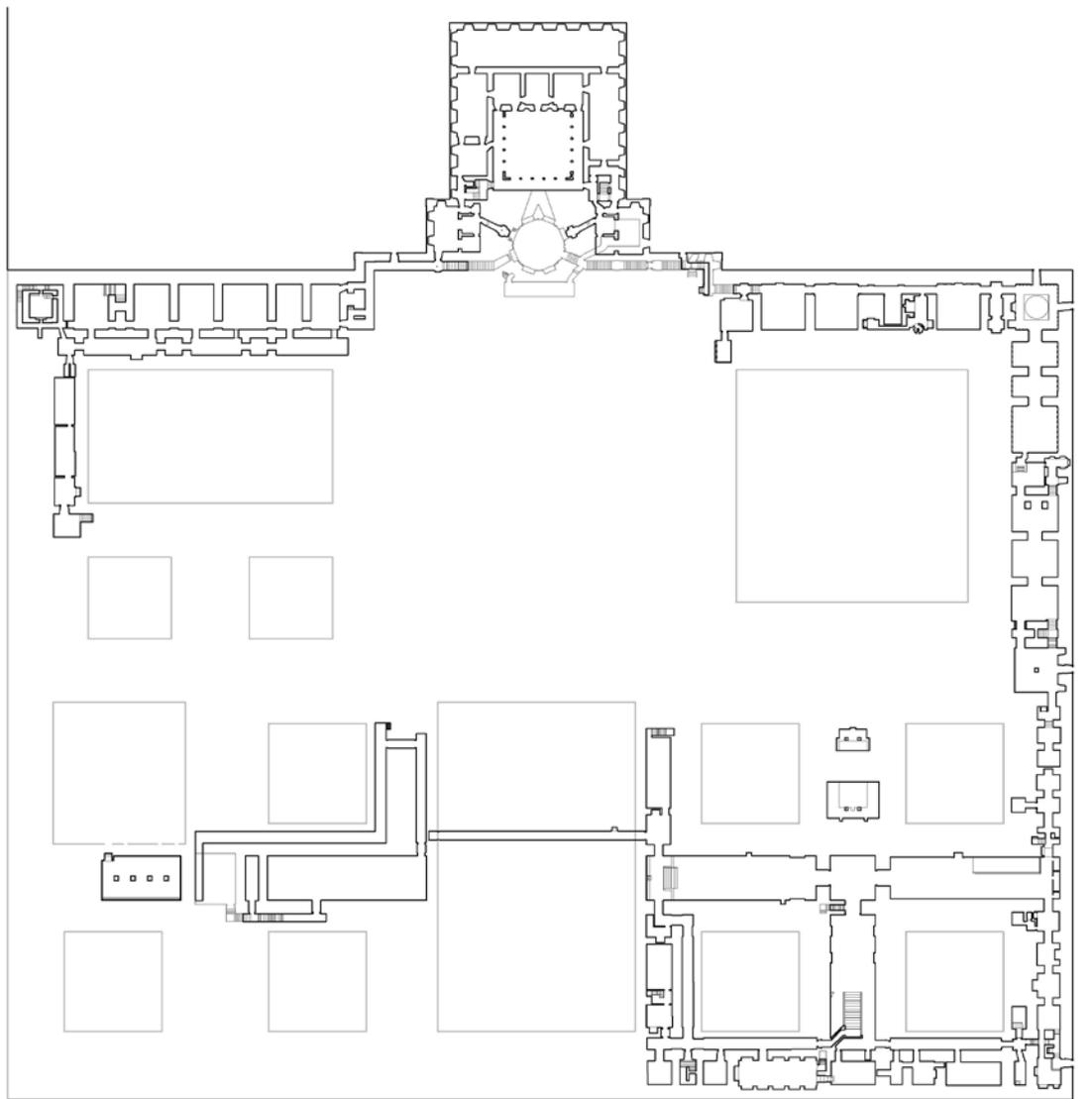


Fig. 10

Planta general de estancias de sótanos del Monasterio de El Escorial, a la cota del Jardín de los Frailes, basada en el levantamiento realizado con Miguel Ángel Alonso Rodríguez en 2001.



- Esta tesis ha tenido la oportunidad de descubrir tres trazados de monteas inéditos en el edificio, en paramentos verticales de granito en los sótanos meridionales y en el nivel principal junto al Claustro Mayor. No hay noticia de la existencia de otras monteas conservadas en El Escorial, por lo que estudios de estos dibujos contribuirán a ampliar el conocimiento del proceso constructivo del edificio. Después de la realización de trazas y modelos, las monteas constituyen uno de los últimos escalones de definición del proyecto, ofreciendo a tamaño natural la descripción precisa de las piezas que adecuadamente dispuestas conformarán cada elemento. El trazado de una montea es un testimonio gráfico original con datos sobre procedimientos constructivos que resulta difícil encontrar en otros documentos o en el levantamiento del propio edificio.⁸

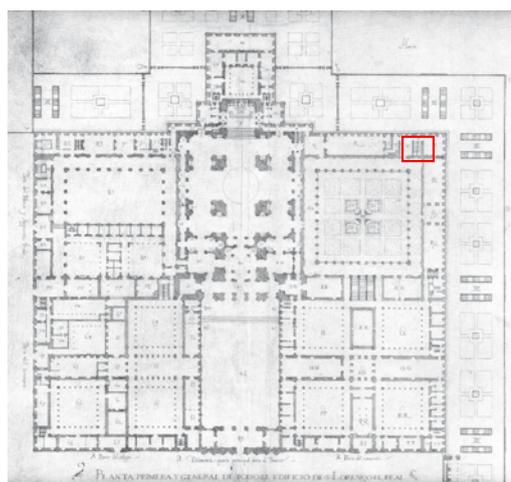
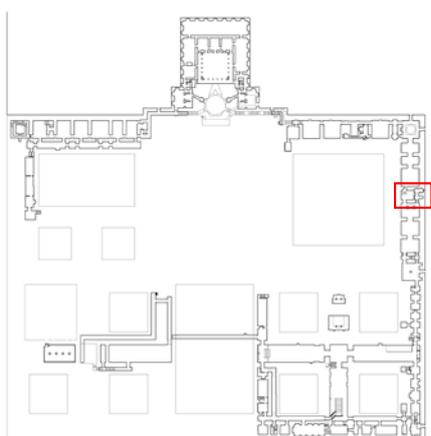


Fig. 11
Localización de las monteas descubiertas.



Fig. 12
Monteas descubiertas por este trabajo en los sótanos meridionales del Monasterio de El Escorial. Para facilitar la identificación de líneas, en parte desaparecidas o poco visibles, se colocó cinta de papel adhesiva a ambos lados de cada tramo localizado. Fragmento de la misma montea, donde se aprecian los trazos realizados con almagre.

⁸ El estudio de las monteas encontradas, que fueron medidas con estación total, se ofrece en el Capítulo 5, dedicado a bóvedas vaídas, porque a ellas se refieren los trazados descubiertos.

- El análisis de los trazados ovales empleados en la iglesia llevó a descubrir un trazado, no conocido en la actualidad, para dibujar un óvalo de cualquier proporción luz-altura, con centros alineados a 45°.⁹

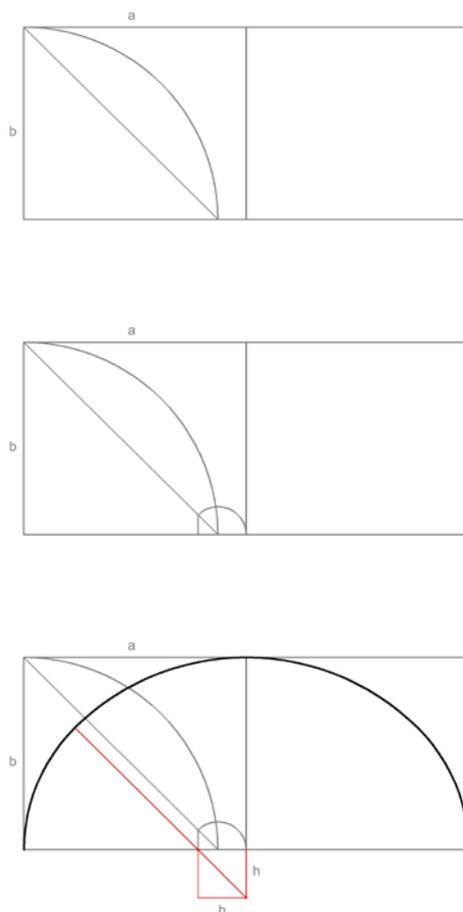


Fig. 13

Trazado oval para cualquier proporción de ejes, con centros a 45°, descubierto por este trabajo.

No está probada su utilización en el Monasterio, pero las bóvedas que se adaptan a este trazado fueron realizadas después de 1576 por Juan de Minjares y Juan de Herrera.

- El estudio de las cúpulas de las torres ha permitido, aparte de proponer una configuración formal y constructiva, aproximar una traza de sección del proyecto de Herrera, no conservada en la actualidad. Las grandes diferencias entre la delgada cúpula herreriana de ese momento y las dimensiones ofrecidas en las condiciones de noviembre de 1579, han permitido proponer una datación más temprana para las trazas de Herrera, que no pudieron ser utilizadas para la contratación.
- Se han ofrecido nuevos datos sobre el proceso de proyecto de la cúpula principal y se ha planteado una nueva propuesta de configuración constructiva, avalada por las inspecciones directas y catas realizadas entre diciembre de 2008 y febrero de 2009 desde los andamios construidos por Patrimonio Nacional para restaurar el intradós de la cúpula.

⁹ La génesis del trazado, el desarrollo matemático de su demostración y la discusión sobre el rango de proporciones en que resulta válido, se encuentra expuesto en el capítulo 4.

OPERACIONES DE ADAPTACIÓN PARA LA EDICIÓN COMO LIBRO

El proceso de adaptación para una edición como libro requeriría, aparte de una revisión y condensación general del contenido, las siguientes operaciones:

- A lo largo de todo el documento, el número de notas a pie de página debería ser reducido. En cuanto a su extensión, sería importante considerar que muchas de ellas se podrían sustituir por el modo Autor-Fecha. Por otro lado, sería posible reducir la extensión del texto principal llevando los desarrollos más prolijos a notas a pie de página.

- La Introducción, capítulo clave en una tesis porque en ella se describe el estado de la cuestión, objetivos y metodología, debería convertirse en una presentación del libro, con una somera descripción de dichas cuestiones.

- El capítulo de Antecedentes podría quedar reducido a una narración de 8 ó 10 páginas o incluso desaparecer, pues el contenido relevante para la comprensión de las bóvedas escurialenses está recogido en los correspondientes capítulos dedicados a éstas.

- Las Conclusiones de la tesis deberían desaparecer como capítulo independiente, reforzándose ligeramente el contenido que sintetizan en el capítulo correspondiente.