

# Radiografía del sustrato geométrico de los edificios. La iglesia de San Millán de Los Balbases, Burgos

Manuel Fortea Luna y Laura Elvira Tejedor

## INTRODUCCIÓN

La geometría es el alma oculta de los edificios. En la geometría está la dimensión, el volumen, la forma y la proporción. Fuera de ella solo queda la piel, la epidermis. Es verdad que esa piel es lo que más fijamente se grava en la memoria visual, pero es verdad que esa piel, sin el sustento, es tan volátil como el aire.

Desde la más remota antigüedad la geometría se ha considerado una de las disciplinas básicas del conocimiento. Platón (427 a.c.-347 a.c.) mandó colocar a la entrada de su celeberrimo «gimnasio» la siguiente inscripción: *Nemo huc geometriae expers ingrediatur* (Qué no entre quién no fuese un gran geómetriae).

Hay que saber leer un edificio a través del lenguaje de la geometría. Hoy se realizan «lecturas de paramentos», pero no se realizan lecturas de geometría. No se puede llegar a comprender el fondo de un edificio atendiendo solamente a la epidermis.

## EL CASO DE SAN MILLÁN DE LOS BALBASES

Para explicar la anterior premisa se pondrá un ejemplo práctico en el que los dos autores de este artículo han trabajado en colaboración: el estudio estructural de la iglesia de San Millán de Los Balbases, en Burgos.<sup>1</sup>

---

1. El informe con título *Análisis de patologías estructurales y propuesta de actuación en la iglesia de San Millán en Los Balbases, Burgos* fue realizado en el año 2020 por la empresa Vault Zafra por encargo de la Dirección General de Patrimonio Cultural de la Consejería de Cultura y Turismo de la Junta de Castilla y León. El equipo redactor estuvo formado por los arquitectos Manuel Fortea Luna y Celia Loarte La Orden.



*Figura 1. Fotografía de la fachada sur de la iglesia de San Millán de los Balbases.*



*Figura 2. Fotografía de la fachada norte y parte de la cabecera.*

Se trata de una iglesia de tres naves con cabecera poligonal y torre a los pies. En la fachada sur destacan el cuerpo adelantado de la portada principal de acceso y restos de construcciones desaparecidas (fig. 1). Por el lado norte, el muro de fachada es un paramento prácticamente liso (fig. 2).

Estructuralmente la iglesia es de bóvedas de cantería apoyadas en los muros perimetrales y en los pilares interiores. Las cubiertas son de época relativamente reciente y están resueltas con estructura de madera. La cubierta de la nave central se eleva por encima de las laterales sobre un levante de ladrillo de época moderna (fig. 3).

En el momento de la realización del estudio, las fábricas estaban afectadas de forma generalizada y las lesiones estructurales eran apreciables a simple vista (figs. 4 y 5). Aunque en este artículo no se dan más detalles del análisis patológico realizado, sí que es necesario hacer un inventario riguroso y completo de todas estas lesiones porque una correcta interpretación de su situación, forma y desarrollo aportan información igualmente fundamental para determinar los orígenes del problema y predecir el comportamiento de la estructura.

---

Para la realización del informe se contó con el trabajo previo realizado por la arquitecta Laura Elvira Tejedor, consistente en la medición con escáner láser y la generación de documentación geométrica tridimensional de la iglesia objeto de estudio. Esta documentación fue realizada por encargo del mismo ente público que promovió el informe estructural.



### LA FOTO FIJA DEL ESTADO ACTUAL: ¿CÓMO NOS ENCONTRAMOS EL EDIFICIO?

En el momento de abordar el estudio de un edificio de estructura de fábrica, lo primero que hay que saber es cómo es su geometría real. Al igual que un médico especialista necesita radiografías y otros análisis de un paciente para estudiar los síntomas que padece y hacer un diagnóstico certero de su enfermedad, un arquitecto especialista en construcciones históricas necesita información geométrica y gráfica que le proporcione datos concretos sobre cuál es el estado de equilibrio del conjunto. Necesita radiografías del edificio. Es decir, gráficos en los que esté representada fielmente la geometría real de las fábricas, sin correcciones ni simplificaciones, pero fáciles de interpretar. O lo que es lo mismo: una foto fija del edificio tal y como es, traducida a un lenguaje legible.

Hoy en día, existe tecnología capaz de capturar la realidad con gran precisión y eficiencia: el escáner láser. Cabe señalar que la nube de puntos obtenida con la medición no es en sí misma un producto acabado, sino una herramienta del proceso. Lo importante es saber extraer los datos que interesan para el reconocimiento de la geometría real del objeto de estudio e interpretarlos correctamente.

Por ejemplo, de las secciones realizadas a la nube de puntos que se muestran en la figura 6, se puede extraer la siguiente información relevante:

*Figura 3. Fotografía en detalle de la esquina noroeste en la que destacan la torre situada en el tramo de la nave sur, los dos grandes estribos de la parte central del hastial oeste y la cubierta de la nave central que se eleva por encima de la lateral sobre un levante de época moderna.*

*Figura 4. Fotografía del tramo previo a la cabecera de la nave norte.*

*Figura 5. Fotografía del tramo previo a la cabecera de la nave sur.*

no se puede llegar a comprender el fondo de un edificio atendiendo solamente a la epidermis

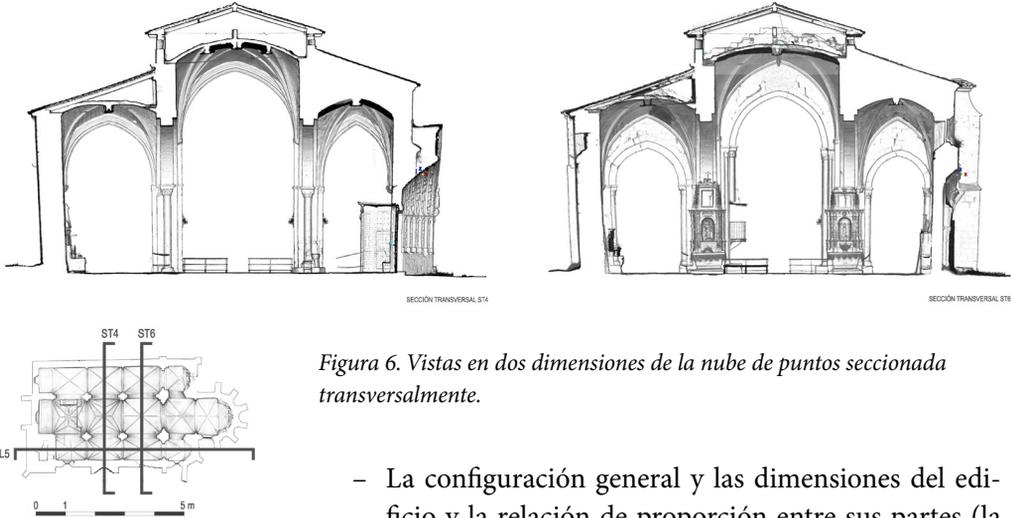


Figura 6. Vistas en dos dimensiones de la nube de puntos seccionada transversalmente.

- La configuración general y las dimensiones del edificio y la relación de proporción entre sus partes (la anchura desigual de las naves laterales, dónde hay y dónde no hay contrarrestos, etc.)
- Las características de los elementos portantes (el espesor de la plementería de las bóvedas y la sección de los nervios, el espesor de los muros y los contrarrestos, etc.), es decir, datos sobre la sección resistente.
- Los añadidos o alteraciones que sirven para identificar momentos constructivos diferentes, que tienen que ver con la evolución del estado de equilibrio.
- Los desplomes y deformaciones más significativas (la inclinación más acusada del muro norte y la consiguiente deformación del arco fajón y las bóvedas de esa nave).
- Los posibles factores que están repercutiendo negativamente en la estabilidad de las fábricas (la estructura de la cubierta, si hay sobrecargas en las bóvedas, etc.)

Una vez «capturado» el edificio, se pueden hacer cuantos cortes y proyecciones se quiera para, sobre ellos, realizar mediciones y analizar deformaciones, niveles, espesores, altura de rellenos, etc.

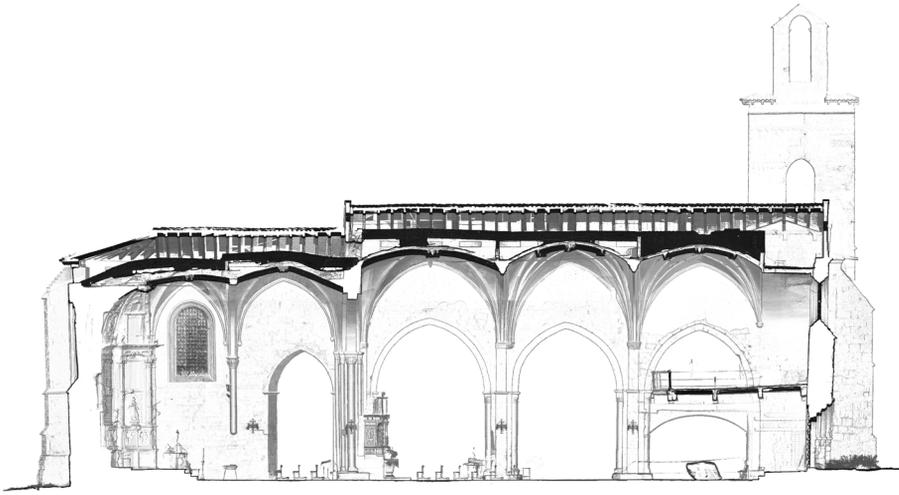
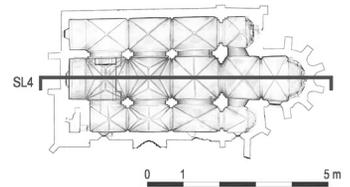


Figura 7. Vista en dos dimensiones de la nube de puntos seccionada longitudinalmente por la nave central.

Del gráfico que se muestra en la figura 7, correspondiente a una proyección en dos dimensiones de la sección longitudinal por la nave central, se deduce la siguiente información:

- Las bóvedas de la nave central y las de la cabecera son de estilos, altura y espesor diferentes, lo que indica, probablemente, que se construyeron en distinta época o por distintos maestros.
- El coro de estructura de madera, que se ubica a los pies de la iglesia, tiene una flecha importante. Además, apoya sobre un arco muy rebajado situado entre pilares.
- En la bajocubierta, en color negro, se ve seccionada la viga de hormigón que carga sobre las bóvedas. Se trata de un resto obsoleto de una estructura de cubierta anterior que apoyaba en dicha viga (fig. 8 y 9).
- Otras anomalías (el hueco abierto a posteriori entre el presbiterio de la nave central, errores de replanteo en la construcción, amputaciones, etc.)

La figura 10 representa un corte en planta realizado a la nube de puntos a la altura del arranque de las bóvedas con la proyección de éstas. Desde el punto de vista estructural, se puede observar lo siguiente:





*Figuras 8 y 9. Fotografías del interior de la bajocubierta de la nave central*

- La planta es de tres naves con cabecera poligonal con presbiterio. Las crujías de las naves laterales son desiguales y sus ábsides tienen distinta forma.
- Todas las bóvedas son de crucería con nervios, salvo las del tramo de los pies de la nave central y la nave norte, que están cubiertas con una pequeña bóveda de cañón. Los diseños de las bóvedas de crucería son todos diferentes, con mayor o menor complicación en la traza.
- En el tramo de los pies de la nave sur se levanta la torre, que contribuye a estabilizar esa parte.
- En cuanto a los contrarrestos, la cabecera dispone de estribos en las aristas, el muro sur tiene elementos que hacen las veces de contrafuerte, el muro norte no tiene ningún estribo y en el alzado oeste hay dos, uno de ellos no alineado con la línea de pilares interiores.
- Los pilares de la embocadura de la cabecera son de mayor sección que el resto.

Hay superficies que son difíciles de representar mediante simples proyecciones en dos dimensiones, como las bóvedas, las cúpulas y los planos deformados. Para analizar estas geometrías se han tomado prestadas técnicas empleadas en topografía, como la representación mediante curvas de nivel. Esto permite estudiar la planeidad de los muros, los desplomes y cualquier anomalía en el caso de elementos verticales y la nivelación, deformaciones geométricas, discontinuidades y resto de anomalías en el caso de elementos horizontales.

En el gráfico de la figura 11 se ha representado la topografía de las bóvedas con una distancia de paso entre tonos

de gris de 10 cm. De la correcta interpretación de este gráfico se extrae la siguiente información:

- Las bóvedas no están afectadas significativamente en su geometría, que es lo mismo que decir que no están afectadas en su comportamiento estructural y, por tanto, en su estabilidad.
- Salvo el tramo de los pies de la nave norte, en el que se refleja una pérdida de simetría significativa. No casualmente, esta es la zona donde hay lesiones activas detectadas por los restos de mortero caídos en el suelo.

El mismo sistema de representación con curvas de nivel se puede aplicar a los paramentos verticales.

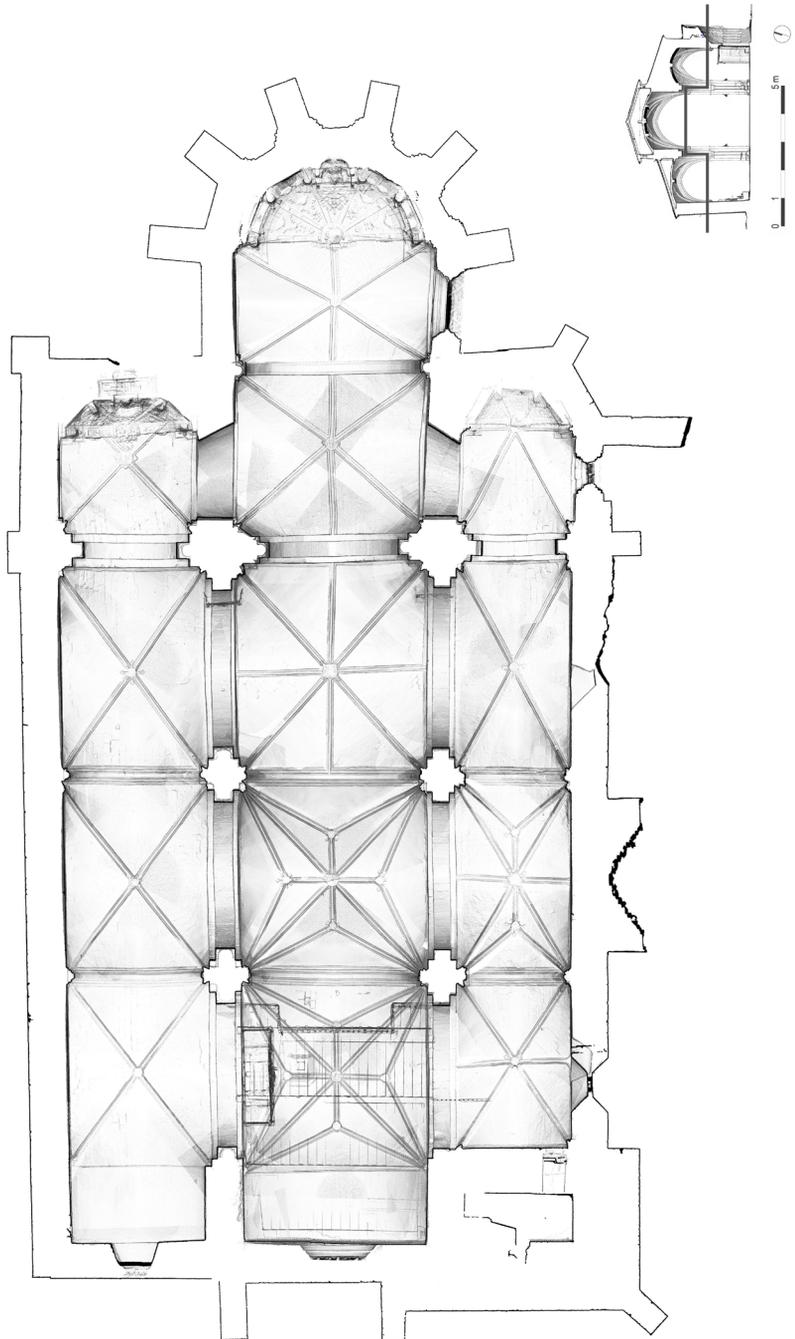
En la figura 12 se muestra, a modo de ejemplo, el gráfico de desplomes del muro norte.

Obsérvese que, a menos espacio entre curvas, mayor inclinación del muro. En este caso, los mayores desplomes coinciden con el estribo, que está alineado con los soportes situados en la embocadura de la cabecera.

#### LA GEOMETRÍA ORIGINAL TEÓRICA: *¿CÓMO SE HA MOVIDO EL EDIFICIO?*

Una vez estudiada la geometría del edificio tal y como nos lo encontramos, se procede a compararla con la geometría original. Comparando ambos estados, el real y el teórico, se puede identificar dónde y cuánto se han movido las fábricas. Las diferencias entre ambas geometrías será producto de algún proceso no planeado, ya sea por los efectos de las leyes de la naturaleza o consecuencias no deseadas de la mano del hombre. La o las causas de la deformación pueden persistir o no en el tiempo, pero su identificación es fundamental para un correcto análisis estructural.

Para deducir la geometría original teórica se parte de la base de que los constructores antiguos, como los actuales, seguían unas normas geométricas básicas y mínimas, como construir las paredes aplomadas, arrancar los pilares y las bóvedas a la misma altura, utilizar un sólo arco de curvatura para simplificar la talla de las dovelas, etc. Esto es, la geometría capturada con la medición de escáner láser se corrige eliminando los supuestos defectos de construcción o patológicos, obteniendo un estado teórico, supuestamente el que deseaba originalmente el constructor.



*Figura 10. Vista en dos dimensiones de la nube de puntos proyectada en planta seccionada a la altura de las bóvedas.*

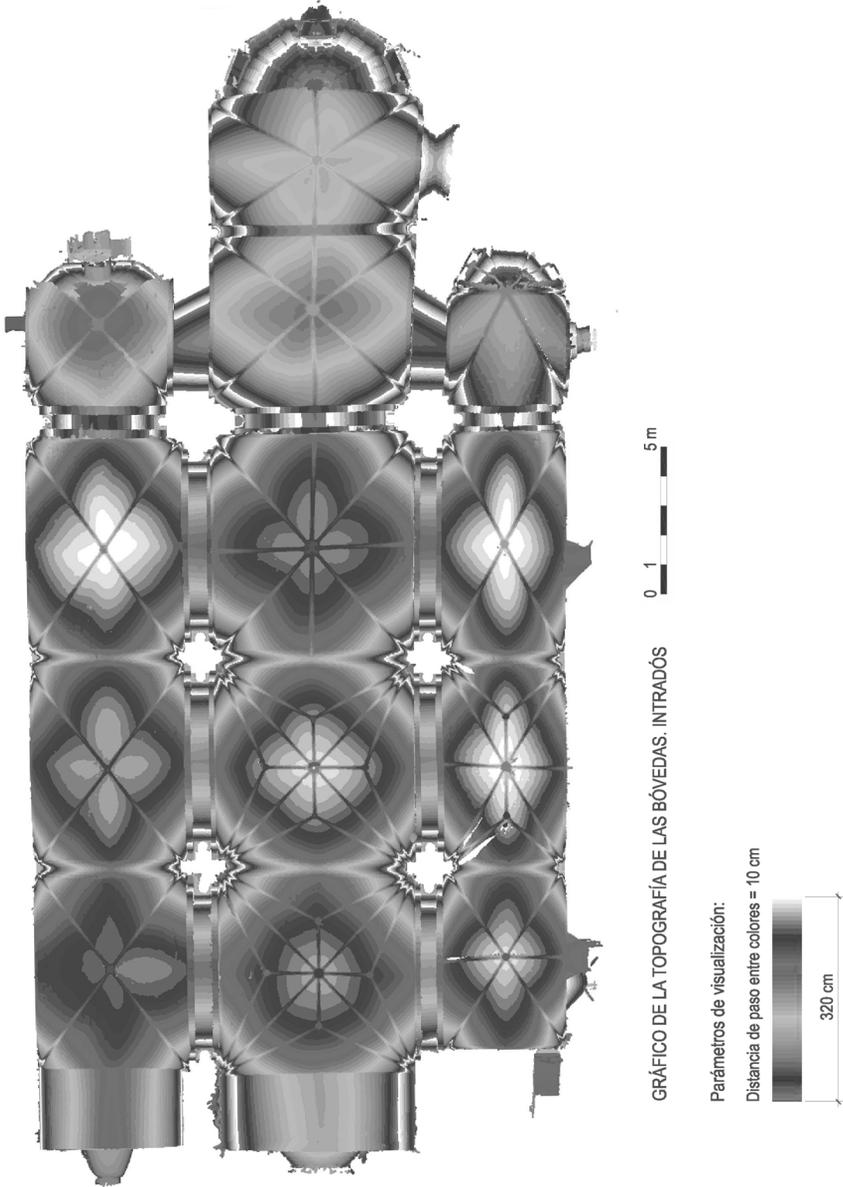


Figura 11. Gráfico de la topografía del intradós de las bóvedas.

Para hacer este análisis comparativo se disecciona el edificio por tantos planos como interese.

En el ejemplo de la figura 13 se ven en color gris los puntos contenidos en la rebanada realizada a la nube que «dibujan» la sección real por un determinado plano. En línea discontinua se ha representado la geometría teórica, la que resulta de corregir los desplomes de los muros y pilares y las deformaciones de los arcos.

Datos que se obtienen del análisis comparativo de esta sección:

- Todas las deformaciones se producen hacia el exterior de forma simétrica respecto del eje longitudinal de la iglesia, aunque más acentuadas en el lado norte.
- El desplome del muro norte es de  $2,8^\circ$  que equivale a un desplazamiento horizontal acumulado en la cabeza de 40,4 cm a una altura de 8,34 m.
- El desplome del muro sur es algo menor, de  $2,2^\circ$ , que equivale a un desplazamiento horizontal acumulado en la cabeza de 32,7 cm a 8,64 m de altura.
- El arco de la nave lateral norte pasa de tener una luz teórica de 3,30 m a 3,48 m (aumento de 18 cm).
- El arco de la nave lateral sur pasa de tener una luz teórica de 2,82 m a 2,94 m (aumento de 12 cm).
- A pesar de ampliarse la luz notablemente, las claves de estos arcos de traza apuntada no tienen un descenso demasiado acusado (12 cm en el arco norte y 6 cm en el arco sur).
- Los pilares también están desplomados hacia el exterior en valores menores a un grado. Hay que destacar que el pilar donde se encuentra el púlpito presenta un abombamiento en la zona de la perforación realizada para instalar la escalera.
- Nota importante: el pavimento y los arranques de las bóvedas están nivelados. Con este dato se descartaría el asentamiento diferencial como causa de las patologías.

Los ángulos de giro de los muros y los apoyos, conocidos por las mediciones realizadas en el proceso de disección del edificio explicado anteriormente, se han plasmado en una única planta (fig. 14). Estas inclinaciones se han representado mediante vectores escalados según su magnitud y a los que también se les ha dado un tono más oscuro cuanto

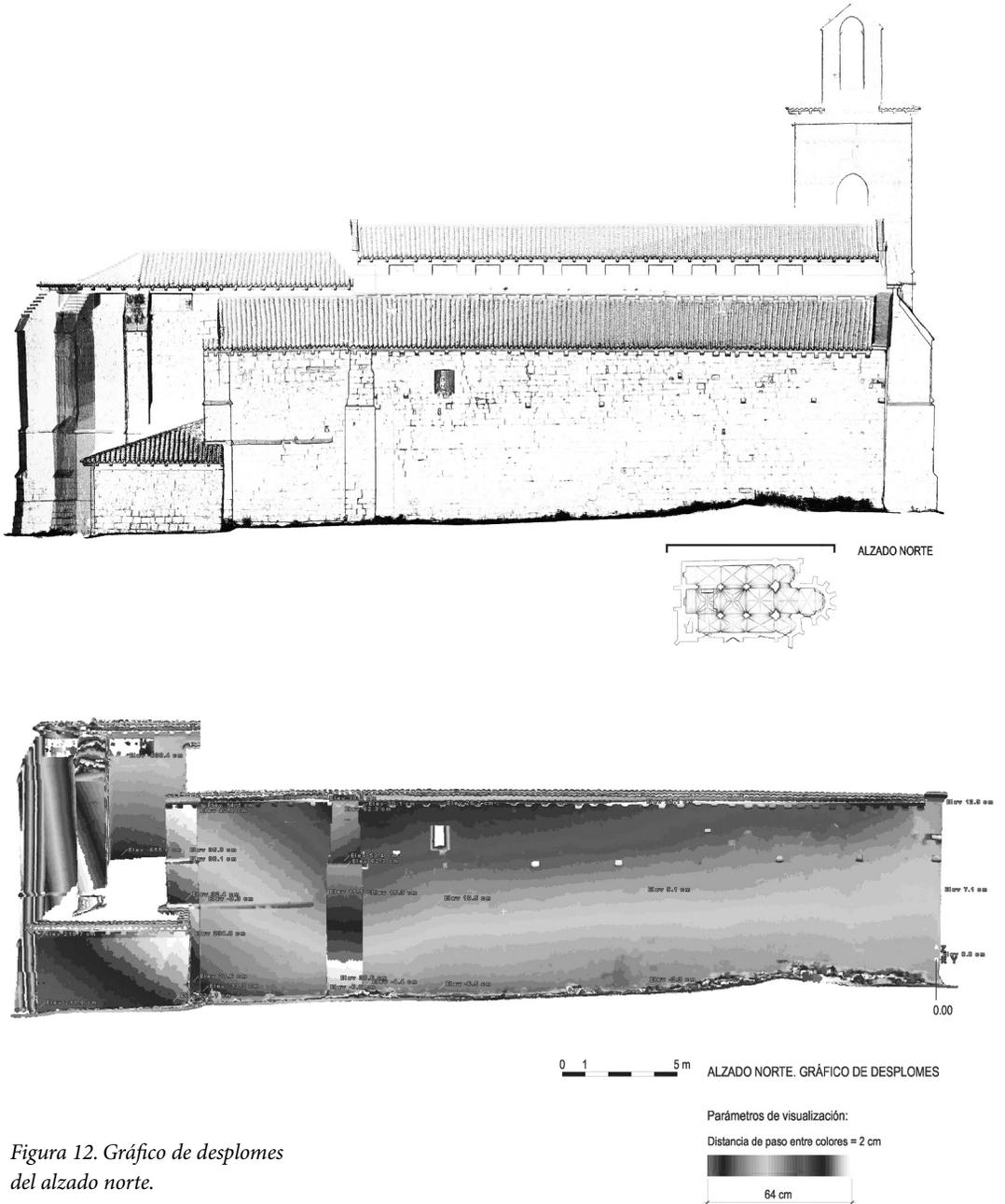


Figura 12. Gráfico de desplomes del alzado norte.

mayor es su valor. De esta manera, se obtiene un diagrama que permite analizar los desplazamientos en conjunto y entender con un golpe de vista dónde y cuánto se ha movido el edificio.

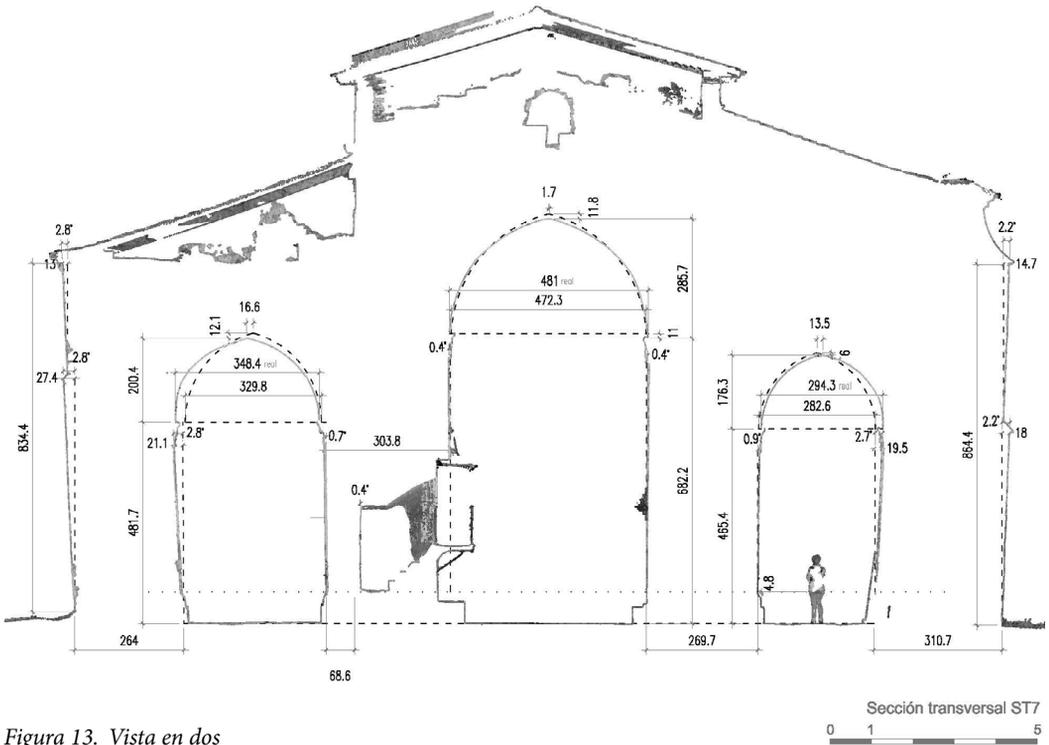


Figura 13. Vista en dos dimensiones de una rebanada vertical de la nube de puntos con el dibujo superpuesto de la geometría teórica y las deformaciones acotadas.

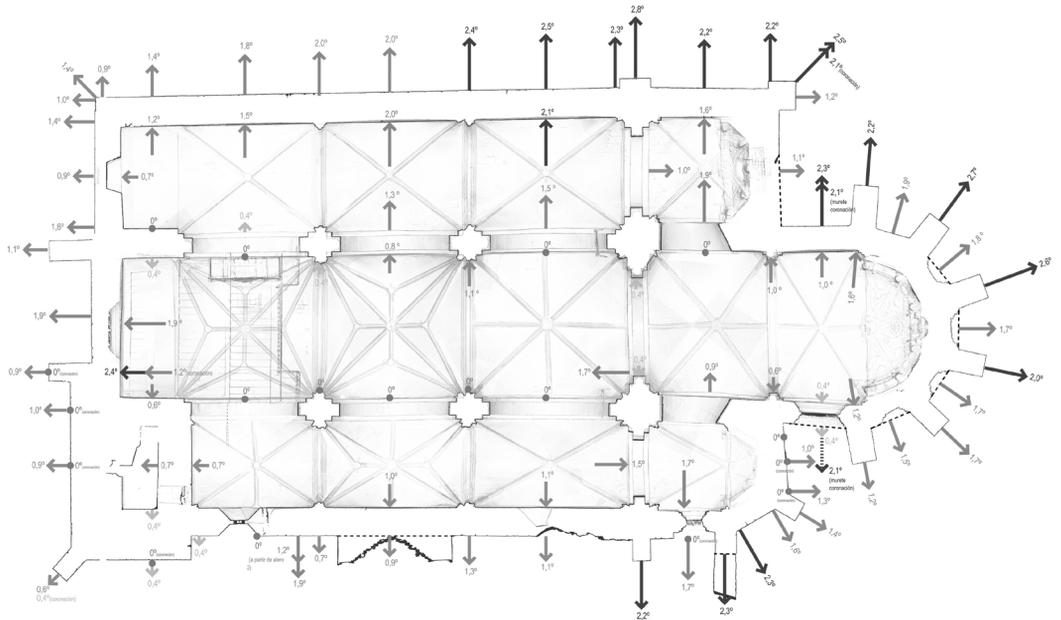
## EL SEGUIMIENTO DE LAS VARIACIONES DIMENSIONALES:

### ¿CÓMO SE MUEVE EL EDIFICIO?

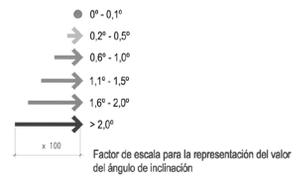
Además del desplazamiento absoluto acumulado en el tiempo, que se ha podido cuantificar comparando la geometría real con la teórica, y que permite saber el grado de seguridad de la estructura en un determinado momento, también hay que tener en cuenta que los edificios sufren movimientos continuamente. Según cómo sean estos, pueden afectar o no a la estabilidad del conjunto.

Los movimientos de una estructura de un edificio en general son de tres tipos:

- Movimientos cíclicos: son los producidos principalmente por cambios de temperatura. Producen deformaciones elásticas que se recuperan al cierre del ciclo (oscilaciones). Los ciclos son diarios, día-noche, y estacionales. Este tipo de movimientos no son relevantes en cuanto a seguridad estructural, pero es



Desplomes de los muros según el ángulo de inclinación



necesario conocerlos para discriminarlos frente a movimientos estructurales. Normalmente están relacionados directamente con la temperatura. A lo largo de un año completo (primavera, verano otoño e invierno) el movimiento absoluto del edificio por este motivo es prácticamente nulo.

- Movimientos puntuales: son originados por acciones concretas, como obras, sismos o micro colapsos. Dependiendo de la magnitud de la acción que lo causa, la estructura puede acomodarse a las nuevas condiciones y estabilizarse, o bien llegar a una situación de colapso parcial. Estas acciones no son permanentes, actúan durante un tiempo y después desaparecen. Por ello, este tipo de movimiento es impredecible, al desconocer las dimensiones de las acciones y el tiempo de actuación.
- Movimientos estructurales: son movimientos de tendencia a largo plazo, originados principalmente por cambios en el estado tensional (modificación en el estado de cargas) o alteraciones de la geometría. El dato más determinante de este tipo de movimiento es la velocidad. Si la velocidad es muy baja (próxima a cero)

Figura 14. Esquema en planta con la representación de los vectores de desplazamiento de las coronaciones de muros y pilares.

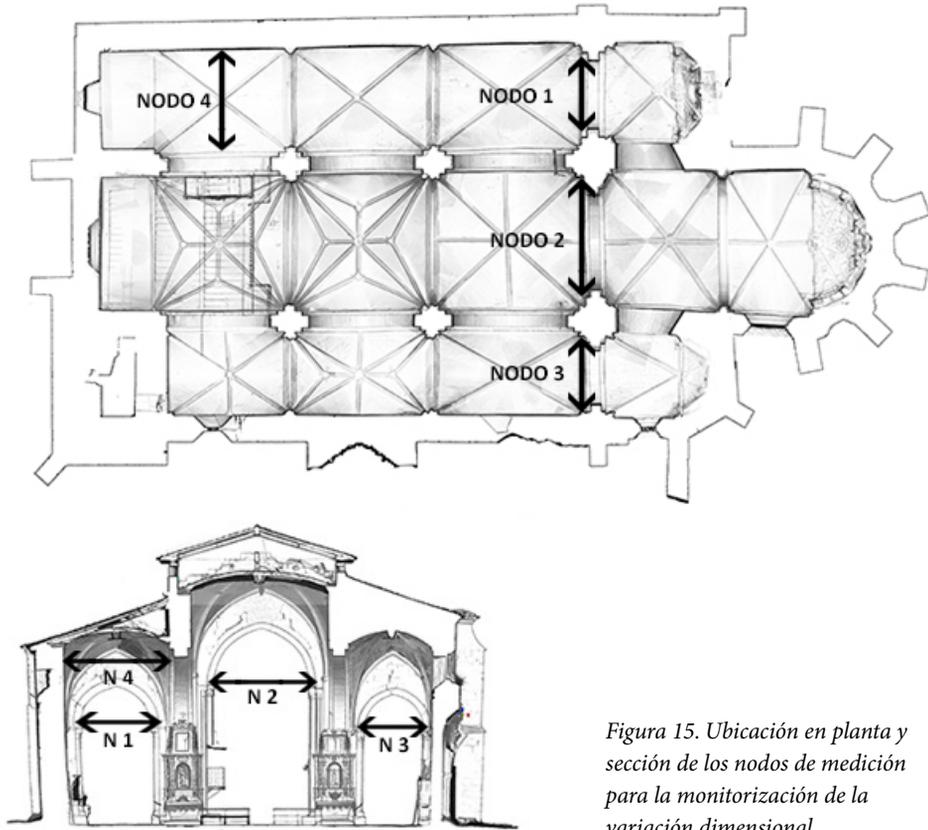


Figura 15. Ubicación en planta y sección de los nodos de medición para la monitorización de la variación dimensional.

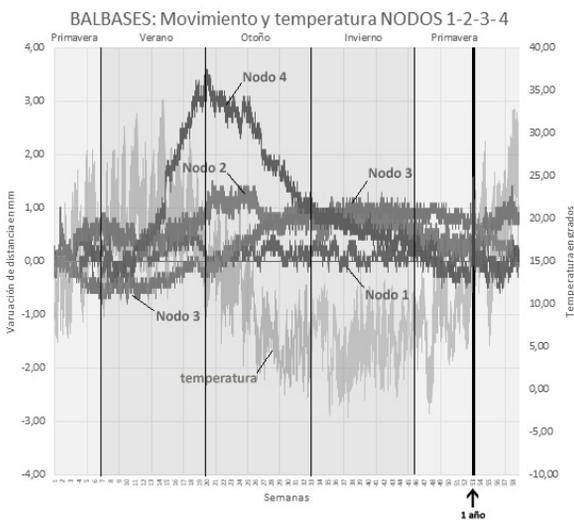


Figura 16. Gráfica con las mediciones obtenidas por los nodos de medición de distancias y temperatura.

estos movimientos no son preocupantes. Por el contrario, si la velocidad es significativa, podemos predecir la fecha del colapso, siempre que sepamos determinar el valor del movimiento necesario para el mismo.

Es sumamente aconsejable controlar dimensionalmente la estructura afectada para vigilar la evolución de sus patologías y deformaciones, dado que, como se ha reiterado, la geometría es crucial para el equilibrio o falta de este, lo cual podría llegar a originar un colapso. Los movimientos de las fábricas se pueden conocer en tiempo real mediante su monitorización, para así saber en todo momento y con precisión si las condiciones sobre las que se ha basado el análisis tensional han variado y cuantificar en qué grado esos cambios afectan al coeficiente de seguridad de la estructura.

Los nodos de medición se han de instalar en puntos estratégicos y estos han de dar información en relación a variaciones dimensionales significativas durante un tiempo prolongado. Para conocer y valorar la evolución de una patología estructural en un elemento de fábrica es fundamental contar con valores globales como pueden ser distancias entre apoyos, distancias entre arranques de bóvedas, inclinaciones de muros en todo un paño, etc.

En el caso de San Millán de Los Balbases, para realizar el seguimiento de las variaciones dimensionales en tiempo real se instalaron cuatro dispositivos de medición remota y periódica, que estuvieron en funcionamiento durante un año (fig. 15).<sup>2</sup> Estos dieron las mediciones plasmadas en el gráfico de la figura 16. Del análisis exhaustivo de estos datos, teniendo en cuenta las variaciones de temperatura tomadas con un nodo instalado al tal efecto y la velocidad de los desplazamientos, se pudieron extraer las siguientes conclusiones:

Al cabo de un año de monitorización, a pesar de haberse registrado movimientos positivos y negativos, todos los

---

2. La monitorización estructural de la iglesia de San Millán de Los Balbases fue realizada por la empresa Vault Zafra por encargo de la Dirección General de Patrimonio Cultural de la Consejería de Cultura y Turismo de la Junta de Castilla y León entre los meses de mayo de 2021 y mayo de 2022. Finalizado el periodo de seguimiento dimensional, el arquitecto Manuel Fortea Luna fue el encargado de redactar el informe de análisis e interpretación de los datos obtenidos.

la geometría es crucial para el equilibrio o falta de este, lo cual podría llegar a originar un colapso

los nodos han vuelto a su posición inicial, salvo el nodo 2 (nave central) que ha experimentado un aumento de 0,8 mm. Destaca el movimiento del nodo 4 (tramo de los pies de la nave norte), desproporcionado en relación a los movimientos registrados por los otros nodos. Por otro lado, los nodos 1, 2 y 3 parecen moverse independientemente de las oscilaciones térmicas. Sólo el nodo 4 parece tener alguna relación con los cambios de temperatura, pero con un decalaje de más de 40 días.

En resumen, el arco central de la cabecera (nodo 2) tiende a abrirse, perjudicando consecuentemente a los arcos de las naves laterales, y la bóveda del tramo de los pies de la nave norte (nodo 4) es la que ha experimentado mayores deformaciones, aunque al final del periodo de estudio ha vuelto a su valor inicial. Es de suponer que esta bóveda es más inestable y sensible a las variaciones estacionales de temperatura.

## CONCLUSIONES

Los edificios se mueven, pero saber si estos movimientos constituyen o no un problema de seguridad nos lo dice su geometría, que es de la que depende su equilibrio. Sabiendo leerla e interpretarla correctamente se pueden llegar a reconocer las causas que originan u originaron las deformaciones e, incluso, pronosticar su evolución en el futuro.

La comparación de la geometría en dos momentos de la vida del edificio, e incluso con la supuesta geometría original, nos indica la evolución que está teniendo el edificio y el conocimiento de la tendencia de esos movimientos nos permite pronosticar el futuro de las fábricas desde el punto de vista de la seguridad estructural.

En el caso que nos ocupa, el de San Millán de Los Balbases, es obvio que el edificio se está deformando por causa de unas sobrecargas en la cubierta que aún perduran (vigas de hormigón de gran formato). La documentación gráfica generada sobre el estado actual permite detectar en qué puntos la estructura está más afectada y, así, estudiar en detalle el grado de seguridad que presenta y analizar su evolución. De esta manera, se tienen datos suficientes para proponer un remedio que ataje la causa del problema de raíz.