

DIAGNÓSTICO Y METODOLOGÍA DE INTERVENCIÓN PARA EL ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO DE CONSTRUCCIONES EN TIERRA CRUDA: EL CASO DE RESTAURACIÓN DE LA IGLESIA DE SAN PEDRO DE ATACAMA, CHILE

Sergio Alfaro¹; Massimo Palme²; Beatriz Yuste³

¹Universidad Católica del Norte, Escuela de Arquitectura, salfaro@ucn.cl; ²mpalme@ucn.cl

³Fundación Altiplano, bea.yuste@gmail.com

Palabras clave: acondicionamiento acústico, espacios religiosos, arquitectura en tierra

Resumen

La arquitectura histórica de los templos cristianos en la Región de Antofagasta, Chile, posee una variedad de manifestaciones de técnicas y tradiciones constructivas que son muestra de diferentes influencias de la trama transcultural que se han hecho presente en el vasto territorio de la Región de Atacama La Grande, esta variedad patrimonial queda reflejada a través de los templos cristianos que se sitúan desde el siglo XVI hasta el XX en tres ámbitos distintos: mundo andino, en lo portuario y en lo minero. El actual Templo, un monumento histórico cuya materialidad es tierra cruda, presenta dentro de sus bienes culturales uno de los últimos Órganos Indianos de madera en Chile, que data del 1600, el cual será objeto de restauración por la Fundación Altiplano, esta pieza será fundamental para el funcionamiento y las propiedades acústicas que adquiera el templo en su proceso de restauración material y cultural. La Escuela de Arquitectura de la Universidad Católica del Norte, elaborará un diagnóstico de las condiciones acústicas del edificio antes de su puesta en servicio, a través de un levantamiento de la geometría de la espacialidad y materialidad del Templo Restaurado, este proceso se realizará mediante tecnología láser con nube de puntos, una vez obtenido este levantamiento digital, se procederá a utilizar programas de simulación que permitan parametrizar el comportamiento acústico del espacio interior de la nave principal del templo, modelando los efectos de las cualidades materiales de las superficies interiores, la geometría de sus elementos arquitectónicos y la carga de uso, para evaluar los efectos en los distintos momentos del culto religioso. Esta ponencia expone resultados de investigación cualitativa y cuantitativa, estudios de levantamiento en terreno con nuevas tecnologías, y recomendaciones técnicas para prever el comportamiento acústico en un edificio de connotación patrimonial destinado al culto, construido y restaurado en tierra cruda.

INTRODUCCIÓN

El proyecto de restauración de la iglesia de San Pedro de Atacama, a cargo de Gobierno Regional y sub-ejecutado por Fundación Altiplano, inició sus obras en junio de 2014. El proyecto se ha convertido en un referente de conservación de patrimonio en Chile, al integrar activamente a la comunidad local y regional en la actualización del diseño y en la ejecución de las partidas en un sistema de Escuela Taller. Los trabajos han contado con la asesoría de especialistas de nivel mundial y el apoyo permanente de una Mesa Técnica Generativa, integrada por destacados profesionales de Gobierno Regional, SUBDERE, DAMOP, Municipalidad de San Pedro de Atacama y Universidad Católica del Norte, que ha contribuido a lograr un proyecto participativo y de alto nivel técnico.

La obra de restauración se ha convertido en una instancia transformadora para el poblado y su comunidad. Durante todo el proceso se contó con una alta participación de la comunidad usuaria a través de iniciativas de aprendizaje, toma de decisiones y ceremonias relacionadas con el avance de las obras. Los mismos atacameños y atacameñas fueron los que trabajaron en la restauración de su templo, al tiempo que lograron recuperar y conservar oficios tradicionales de su territorio, con un propósito de desarrollo sostenible para la región. Este proceso de aprendizaje/capacitación culminó con una certificación técnica para los trabajadores emitida por la Universidad Católica del Norte, que los certificó en competencias de construcción en tierra.

El diseño de restauración de la iglesia de San Pedro responde a la actualización del proyecto existente, elaborado por la empresa Plan Arquitectos entre 2009 y 2010, por licitación de la Dirección de Arquitectura MOP y aprobado por el Consejo de Monumentos Nacionales en junio de 2010. Tras revisar preliminarmente el proyecto existente y definir junto al mandante las condiciones ideales de trabajo, de acuerdo a la experiencia exitosa lograda en proyectos similares del Plan de Restauración del Conjunto Patrimonial de Iglesias Andinas de Arica y Parinacota, Fundación Altiplano MSV¹, asumió la responsabilidad de sub-ejecutar el proyecto, por medio del convenio celebrado en noviembre de 2013.

La propuesta de intervención del templo responde a una actuación restaurativa integral, respaldada por la conducción y asesoría de profesionales con formación, conceptual y pragmática, en restauración arquitectónica y artística; sumándose la participación de cuadrillas locales con experiencia y adiestramiento en intervenciones patrimoniales (Escuela Taller –FAMSV). La intervención está orientada a las siguientes acciones de restauración:

Consolidación de fundaciones: Se realizaron excavaciones sectoriales hasta el punto de contacto con las fundaciones bajo supervisión arqueológica. Se examinó el estado de las fundaciones y se llevó a cabo un proceso de consolidación. En la consolidación de las fundaciones se realizaron calzaduras con piedra y morteros de cal y arena.

Restauración y reforzamiento de muros y contrafuertes: Se realizó una consolidación integral de los muros de adobe. La consolidación pretendió específicamente el afianzamiento de las capacidades estructurales de los muros y contrafuertes. Tras la liberación de los revoques en el interior y exterior de los muros se verificaron los daños para evaluar su condición y medida de estabilización. La estabilización consistió en la reparación de grietas con calzaduras de adobes secos, en los casos donde la profundidad de los daños fuera mayor de 4 pulgadas, se aplicó consolidación de revoque de barro cuando la profundidad de los daños era menor de 4 pulgadas e inyección de barro en fisuras. El reforzo estructural de los muros se realizó mediante enmallado de sogas sintéticas o drizas; incluyendo a los contrafuertes existentes o nuevos.

Restauración de la techumbre: Tras el desarme controlado de la cubierta se procedió a la inspección y restauración de la estructura de par y nudillo. Teniendo como referencia la recuperación de gran parte del material pre-existente. Se repararon los materiales antiguos (par y nudillos de madera, uniones clavadas y amarradas con tientos) y se realizaron los ajustes necesarios en el Taller de Carpintería; posteriormente, se aplicó sobre la madera elementos protectores. Se reforzó la viga collar perimetral de todos los ambientes, se fijó a los muros con las sogas verticales y a la cubierta con clavos y tientos, así se logró la eficiente conexión entre cubierta y muros.

Restauración del piso interior: Tras el retiro controlado del pavimento interior de pino Oregón americano en naves y capillas laterales y la identificación de cada pieza, se analizaron y seleccionaron aquellas piezas que se encontraban en buen estado para ser restauradas e integradas.

Terminaciones en muros: Para la implementación de esta partida se consideraron, previamente, las potencialidades ofrecidas por las canteras locales, depósitos geológicos desde donde el equipo de obra se proveyó de tierra, arena y aglutinantes orgánicos. El revoque se aplicó en dos capas, la primera relativamente gruesa (4 cm) y, la segunda, particularmente delgada (0,5 cm).

Restauración y restitución de puertas y ventanas: Previo reconocimiento de la condición patológica de la carpintería de madera, se estimó, su desmontaje o trabajo en terreno. Los procesos incidieron en la liberación de adiciones, la restitución de piezas, la recuperación de nivel en puertas de acceso y la consolidación-protección frente a xilófagos y humedades. Complementariamente, se realizaron mantenimientos puntuales en los elementos de metal.

¹ Acrónimo que significa: Monseñor Salas Valdés.

Instalaciones: El suministro de energía eléctrica para la iglesia estimó una conexión a la red eléctrica local conforme a las disposiciones del código eléctrico chileno vigente en plena concordancia con los criterios de sostenibilidad y respeto medioambiental. La propuesta enfatizó el uso de circuitos de iluminación interna y externa, con lámparas tipo

Se instaló un sistema de alarma adecuado para la seguridad y protección del templo, que incluye la integración de un componente de vigilancia.

Se instaló un sistema de sonido para las celebraciones litúrgicas y costumbres que se lleven a cabo en el templo, de tal manera que la implementación del sistema fue acorde a los criterios y técnicas patrimoniales de la restauración.

Obras exteriores: Para controlar en forma proporcional la conducción de humedades y escorrentías hacia la fábrica principal del conjunto religioso, se ejecutó la adecuación de un sistema de drenaje. Realizando el rebaje controlado de los sedimentos acumulados en el atrio del templo con supervisión arqueológica. El sistema de drenaje consistió en la habilitación de un circuito de canaletas de piedra perimetrales al edificio. Paralelamente se recuperó el pavimento-recorrido de tipo huevillo o canto rodado en el atrio perimetral del templo que contribuye a la adecuada evacuación de aguas lluvia hacia el sistema de canaletas.

Restauración de bienes culturales: Los trabajos de restauración artística comprendieron acciones de conservación preventiva y restauración artístico-estructural. Las capacitaciones a la comunidad de San Pedro de Atacama se implementaron en el transcurso de toda la obra. La cuadrilla de bienes culturales incorporó a gente del lugar y a técnicos de amplia experiencia en el área de conservación y restauración patrimonial. La restauración de bienes culturales comprendió la restauración del retablo del Altar Mayor, cuatro imágenes y un órgano indiano.

Acondicionamiento Museográfico: El templo es por sí mismo una obra de arte y, tomando en cuenta, el despliegue narrativo del conjunto religioso se implementó un circuito patrimonial debidamente señalizado y de carácter interpretativo, evitándose la inclusión de cualquier elemento que restara protagonismo al evidente sentido pedagógico patrimonial del templo.

El nuevo proyecto aplica la metodología desarrollada por Fundación Altiplano para el Plan iglesias andinas de Arica y Parinacota. La intervención se ciñó a los criterios recomendados por las cartas y normas vigentes y fue el resultado de un análisis lógico multidisciplinario de los principales elementos de valor patrimonial del templo, tangibles e intangibles, así como del estado de conservación de estos, afectados por daños y causas. El proyecto se elaboró con participación de profesionales de distintas especialidades, representantes de la comunidad, y asesoría de especialistas de alto nivel. Durante el proceso ejecución, el proyecto fue asistido por una mesa técnica que sesionó mensualmente integrada por profesionales especialistas del ámbito académico de la región, funcionarios de las instituciones públicas vinculadas al proyecto y representantes de la comunidad usuaria.

La filosofía de intervención patrimonial y preventiva declarada por la Fundación Altiplano buscó ser respetuosa de los valores históricos, estéticos y culturales del conjunto religioso, con especial atención a los usos valores patrimoniales de la comunidad usuaria. Se declaró además una intervención remedial, por cuanto asume la acción de los agentes de riesgo, promoviendo medidas preventivas de acuerdo a las normas nacionales e internacionales, para garantizar un comportamiento adecuado refrene a la humedad y los sismos.

Las actuaciones de intervención patrimonial asumidas por la Entidad Sub- ejecutora del proceso de restauración patrimonial de este inmueble se basan en las siguientes estrategias: "territorialidad, investigación multidisciplinaria, autenticidad, mínima intervención, reversibilidad, seguridad, participación comunitaria, restauración como un hito en la conservación histórica del edificio, Escuela Taller. Capacitación y desarrollo sostenible." (Fundación Altiplano, 2014)

La ponencia que se presenta tiene como objetivo poner en discusión los aspectos de acondicionamiento acústico para precisar las condiciones de funcionamiento de la

recientemente restaurada iglesia de San Pedro de Atacama, este templo construido con materiales locales en sus muros y techumbres utilizando técnicas constructivas en tierra cruda, estructuras de techumbre de maderas de “Chañar” y “Algarrobo”, cielos elaborados con tablillas de cactus “Cardón” y pisos de madera de “Pino Oregón”, este último un material introducido en el norte de Chile a propósito de la explotación salitrera, todos estos materiales, la geometría y proporciones del espacio constituyen las variables a ser discutidas en la presente ponencia, a propósito de la celebración y los ritos del culto religioso que se desarrollan en la liturgia y las fiesta conmemorativas del templo.

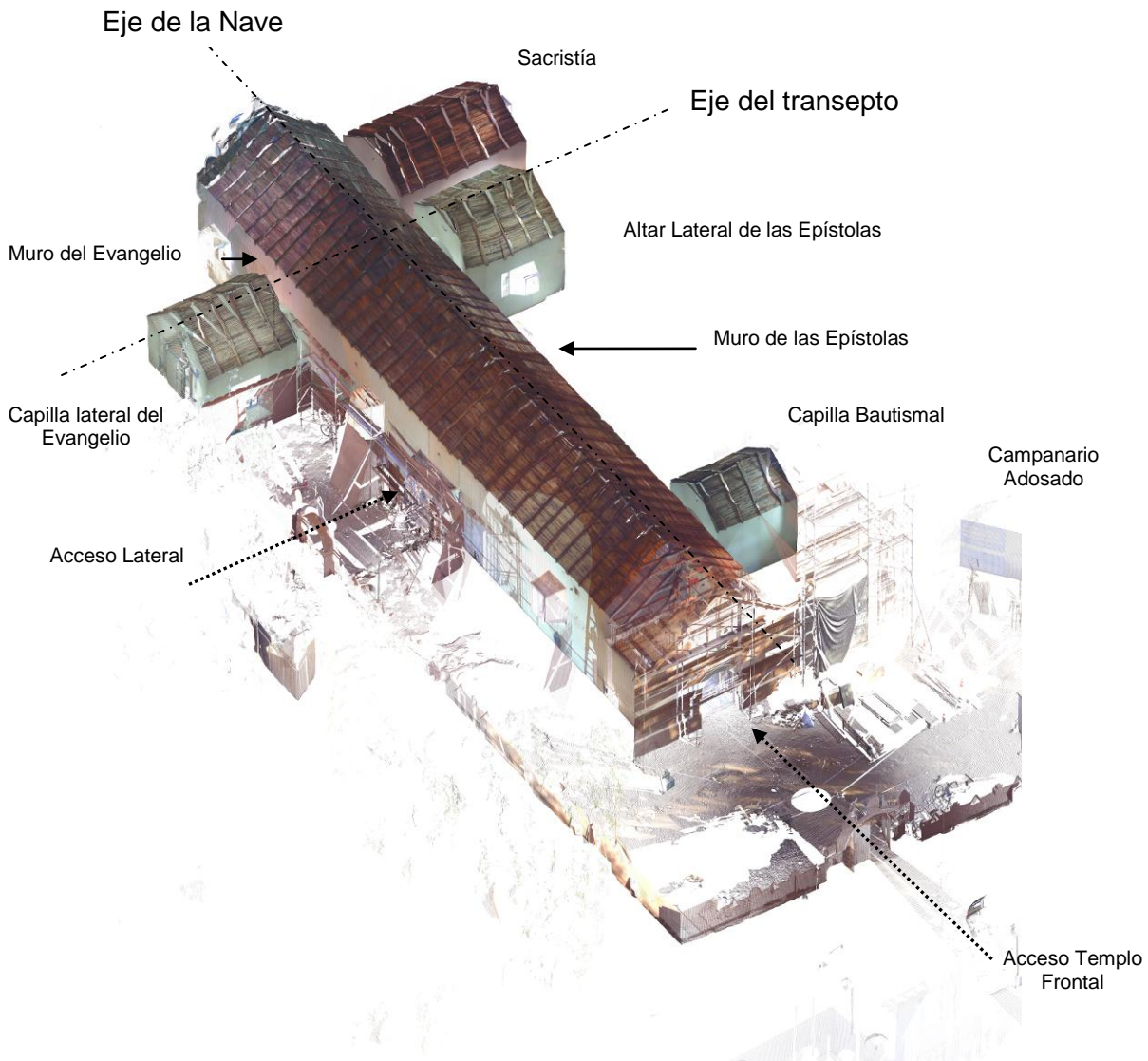


Figura 1. Imagen 3D del proceso de escaneo interior de la Iglesia con la muestra de los ejes principales y capillas laterales a la nave (Crédito: Caquisane², 2015)

Dentro de las características evolutivas del tamaño y la configuración del espacio del templo de San Pedro de Atacama esta serie de cambios se han relacionado con la acción de sucesivos efectos sísmicos e incendios de los cuales se da cuenta en libro Rescate del Patrimonio Material Más Antigo de la Región de las iglesias precordilleranas a los templos urbanos (Núñez; González; Galeno, 2010). Según el recuento de eventos el actual templo de San Pedro de Atacama. Para Núñez, González y Galeno (2010, p. 48)

² José Caquisane, Laboratorio de Lasermetría, Escuela de Arquitectura Universidad Católica del Norte

Si bien se reconoce que los primeros españoles pasaron por el oasis en 1536 con el conquistador Diego de Almagro que retornaba hacia el Cuzco, se ha considerado el antecedente que indicaba que el origen que indica que el conquistador Pedro de Valdivia en su viaje de la conquista de Chile, estuvo dos meses en Atacama, desde el 15 de junio al 15 de agosto de 1540, habiendo ordenado la fundación del primer templo... Esa primera capilla, con los sucesivos crecimientos correspondería dentro de la actual estructura a los crecimientos del "presbiterio, los transeptos y la parte principal de la nave, los que habrían sido construidos en una fecha entre 1540 y 1557, pero destruidos en un gran incendio en 1839, de los cuales se mantendrían las bases, como lo ha indicado Casassas.

Por otro lado el investigador Roberto Montandón ha indicado que el actual templo se habría construido en 1774, lo que debe corresponder a una gran ampliación de la capilla inicial. Esa fecha debe hacer referencia a una descripción completa del templo hecha por Fray Lorenzo Caballero en 12 de octubre de 1774, como lo indica Lezaeta en su Libro de Fundaciones. Montandón coincide en su reconstrucción entre 1839 y alrededor de 1843, con las medidas de 41 metros de largo por 7,5 de ancho, definiendo la mayor nave de esta región. Si tomamos como referencia la vara de burgo: 0,835905 m, la principal de las unidades utilizadas, esas medidas corresponderían a 49 x 9 ¼ varas.



Figura 2. Imagen 3D del proceso de escaneo interior de la Iglesia³. (Crédito: Caquisane, 2015)

³ Muestra medidas interiores de la nave principal, en el fondo de la imagen se aprecia coro de madera, lugar de ubicación del órgano Indiano

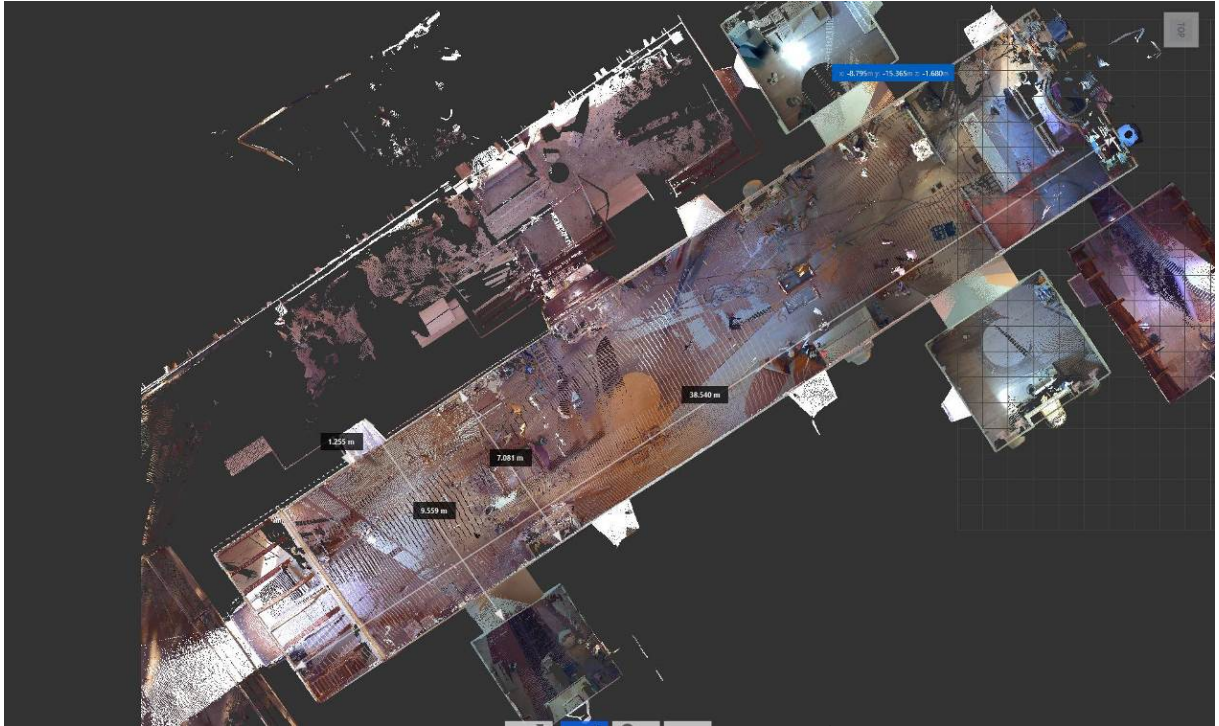


Figura 3. Imagen 3D del proceso de escaneo interior de la Iglesia⁴. (Crédito: Caquisane, 2015)

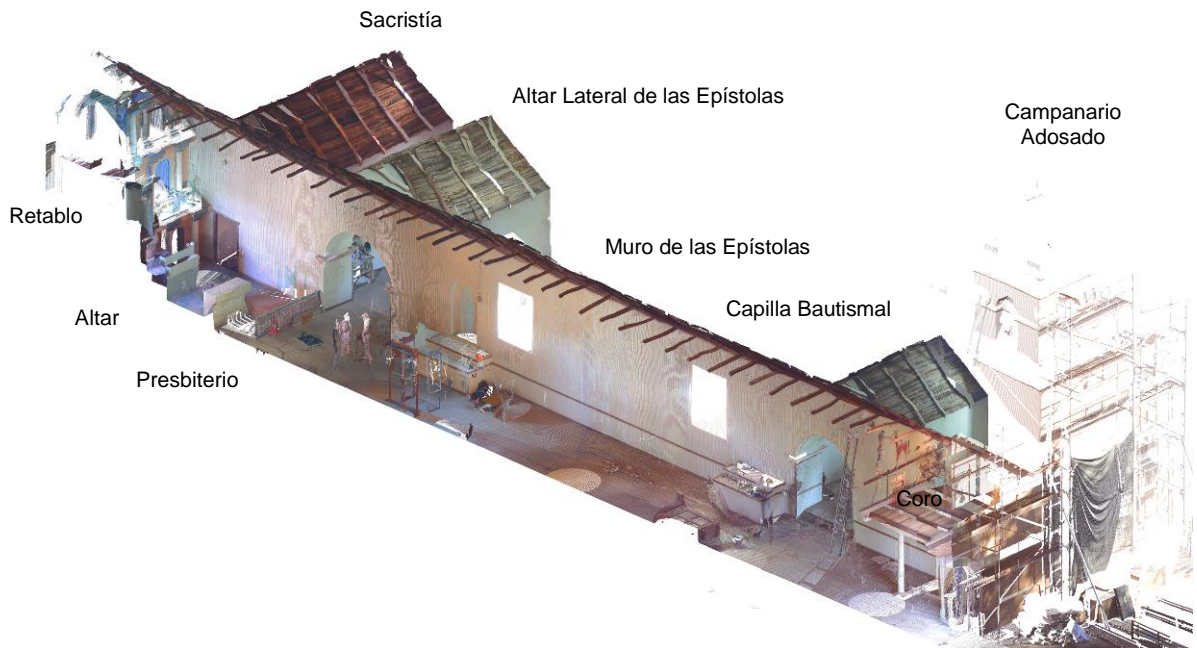


Figura 4. Muestra sección longitudinal interior del muro de las Epístolas. (Crédito: Caquisane, 2015)

⁴ Muestra medidas interiores de la nave principal, vista en planta. La medida longitudinal interior indica 38,50 m, medida que sumada al espesor promedio de los muros de adobe correspondiente a 1,20 m arroja un largo total de la nave cercana a 40,9 m, lo que indicaría que los datos aportados por Ricardo Montandón serían correctos.



Figura 5. Muestra sección longitudinal interior del muro del Evangelio. (Crédito: Caquisane, 2015)

El templo que en su actual proceso de restauración patrimonial consideró no sólo la realización de los oficios religiosos, sino que además acoge de manera significativa el culto y la devoción de sus fieles en la veneración de sus santos y patronos, la puesta en valor de este patrimonio material consideró dentro de su programa de recuperación la restauración del órgano indiano de 250 años aproximados de antigüedad, el instrumento volvió a sonar luego de 120 años de silencio en un concierto de música colonial americana en el coro del templo restaurado que se abrió a la comunidad el 27 de junio para la celebración de su santo patrono San Pedro. Este evento requería determinar cuál era la condición acústica del espacio ceremonial de la nave central del templo, para lo cual se presenta en adelante el resultado de esta investigación desarrollada con el uso de programas de simulación acústica basado en el análisis de datos numéricos y gráficos que permitan visualizar la calidad de los efectos de la emisión y recepción acústica de los estímulos auditivos dentro del templo.

DIAGNÓSTICO ACÚSTICO

La Iglesia de San Pedro de Atacama presenta, según observaciones directas y sensación declarada por muchos visitantes, excesos de reverberación que impiden una buena participación de las ceremonias religiosas. Al mismo tiempo, se detecta cierta dificultad para hacer llegar el sonido hacia los puntos más alejados de las fuentes. Normalmente, los oradores se ubican o bien en el púlpito para las lecturas, o a la altura del altar. La zona más alejada resulta por lo tanto la zona cercana a la entrada principal de la iglesia. En las figuras 6 y 7 se puede observar la iglesia durante el proceso de restauración, destacando las paredes de tierra cruda, que presentan un acabado muy liso y por lo tanto coeficientes de absorción muy bajos.



Figura 6. Vista del púlpito y del altar (Crédito: Alfaro, 2015)



Figura 7. Vista de la puerta de acceso y del coro (Crédito: Alfaro, 2015)

Para verificar el fundamento físico de las observaciones reportadas, se realizaron simulaciones del funcionamiento acústico de la iglesia con el software Ecotect de Autodesk. El software permite obtener los tiempos medios de reverberación del espacio, una vez que se hayan introducido los siguientes parámetros de entrada: coeficientes de absorción de los materiales, por grupos de frecuencia; volumen ocupado; cantidad de personas y mobiliario; superficies interiores desarrolladas. En figura 8 se puede observar el modelo realizado con la herramienta y en tabla 1 se aprecian las propiedades acústicas de las superficies consideradas.

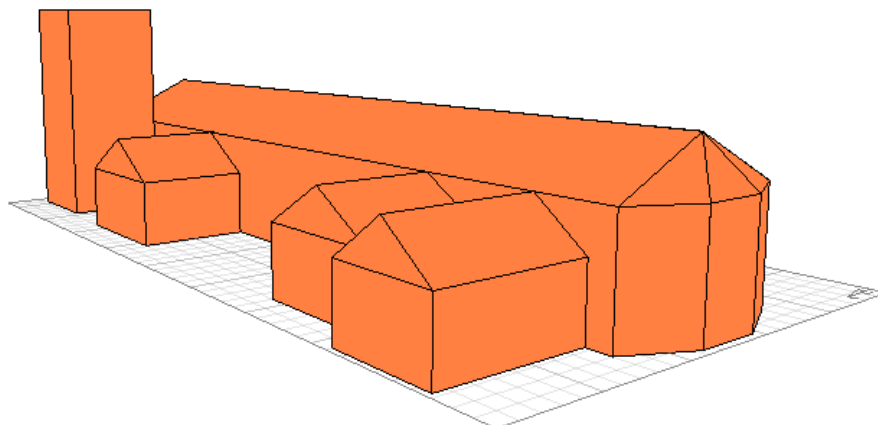


Figura 8. Modelo Ecotect del edificio (Crédito: Caquisane, 2015)

Tabla 1. Propiedades acústicas de los materiales

Elementos	Absorciones (%) por frecuencias (Hz)								
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Paredes	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,06
Techo	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06
Suelo	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,07	0,07	0,04
Ventanas	0,17	0,14	0,09	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
Puerta	0,18	0,14	0,12	0,08	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04
Bancas	/	/	0,25	0,20	0,04	0,04	0,04	/	/
Personas	/	/	0,61	0,75	0,86	0,91	0,86	/	/

La cantidad de personas estimada para la simulación ha sido de 50, por un total de 100 asientos en las bancas (50% de ocupación). Los valores de absorción han sido obtenidos desde la base de datos de Ecotect (Marsh, 2000) y desde revisión bibliográfica más general (Neila, 2008; Flores et al, 2013). La evaluación del tiempo medio de reverberación es calculada en Ecotect a través de la ecuación (1) de Millington-Sette, que permite una buena aproximación a los resultados experimentales:

$$T_{MR} = 0,161 \frac{V}{-\sum_i S_i \times \ln(1 - \alpha_i)} \quad (1)$$

Donde: V: volumen interior

S_i : superficie interior i

α_i : absorción acústica de la superficie i

En figura 9: se muestran los resultados de la simulación de los tiempos de reverberación con los parámetros descritos. Se puede apreciar como el espacio sea más reverberante de lo recomendable (mucho más, en realidad), especialmente en el rango de frecuencia de los sonidos más bajos, entre 63 Hz y 1000 Hz. En ese rango de frecuencias, solamente los vanos (ventanas, puertas, espacio entre las bancas) pueden aportar un mínimo a la absorción general del sonido. En las medias y altas frecuencias, las personas aportan mucha absorción, pero los materiales de la iglesia (especialmente las paredes) no contribuyen prácticamente en nada a la reducción de la reverberación. Los valores recomendables para escuchar la palabra y la música en ambientes de pequeño volumen, son de 0,95 y 1,6 segundos respectivamente (Neila, 2008; Serra; Coch, 1998; Arau, 2012). La simulación Ecotect muestra para la iglesia de San Pedro unos valores de entre 3,5 y 9 segundos de reverberación, verificando de tal manera las sensaciones de los usuarios de eco y dificultad para entender la misa.

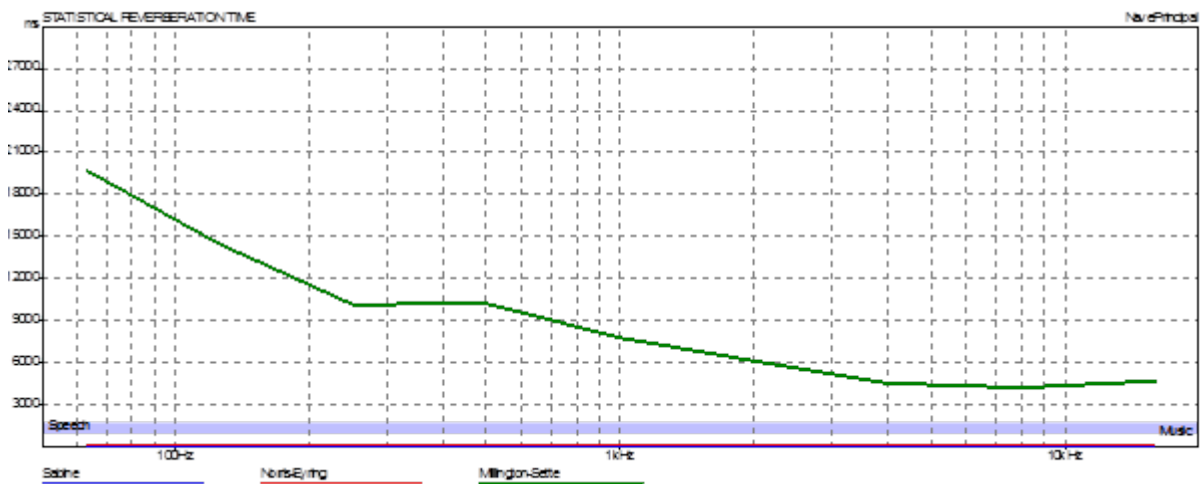


Figura 9. Tiempos medios de reverberación calculados con Ecotect

La otra característica relevada es la asimétrica distribución del sonido en la larga nave de la iglesia: cerca de la fuente sonora se presenta una buena llegada del sonido directo (que viene después distorsionado en parte por la reverberación), mientras que en el fondo de la iglesia hay prevalentemente sonidos reflejados. La figuras 10 y 11: evidencian esta distribución.

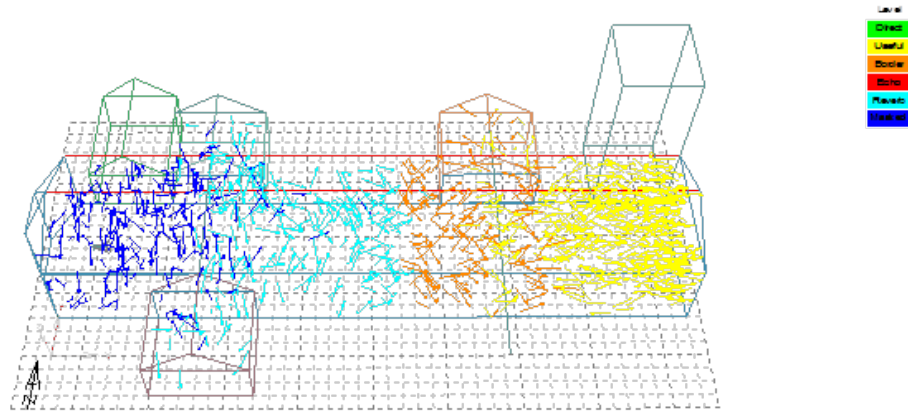


Figura 10. Rayos acústicos simulados con Ecotect

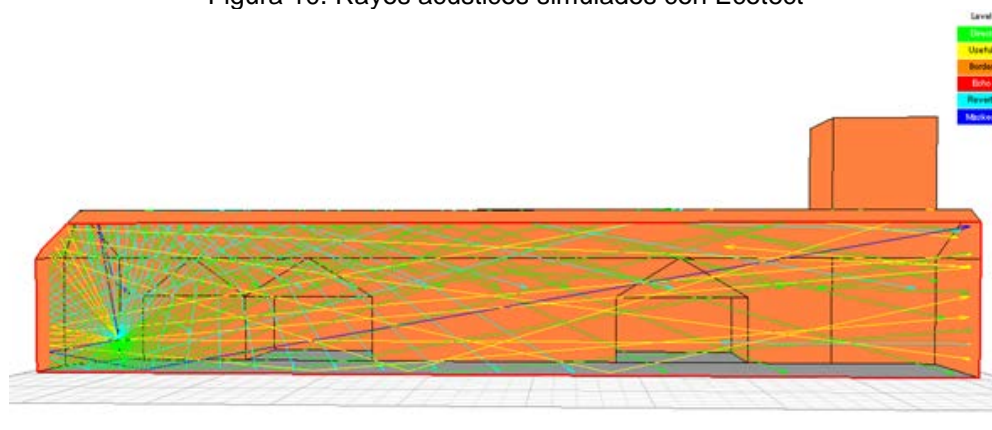


Figura 11. Densidad de rayos acústicos en las diferentes zonas

RESTAURACIÓN

Para obviar a las situaciones relevadas (asimetría en la distribución del sonido y reverberancia muy elevada), se simularon algunas soluciones teóricas al problema, para pasar después a unas propuestas prácticas de intervención.

Paneles absorbedores en las paredes y en el techo

Como primera opción se consideró la instalación de paneles en las paredes laterales y en el techo de la iglesia, que tengan un perfil de absorción del sonido como el representado en la tabla 2. Estos paneles, que tienen una absorción de mediana y alta frecuencia, pueden ser de diferente tipología, desde madera perforada con diferentes diámetros de hueco (absorbedores de Helmholtz) o absorbedores porosos. Una situación parecida pudiera obtenerse también con decoraciones que aporten cierta irregularidad superficial.

Tabla 2: Propiedades acústicas de los paneles considerados

Elementos	Absorciones (%) por frecuencias (Hz)								
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Paredes	0,03	0,03	0,05	0,1	0,3	0,5	0,6	0,6	0,4
Techo	0,05	0,08	0,1	0,25	0,43	0,55	0,7	0,7	0,5

Con la instalación de paneles como los considerados, las simulaciones realizadas llevan el tiempo medio de reverberación del espacio dentro de los parámetros recomendables. Las figuras 8, 9 y 10: muestran los valores obtenidos desglosados por frecuencias, destacando que la intervención en el techo podría ser algo más efectiva que en las paredes y que lo más

recomendable sería intervenir tanto en paredes como en techo para obtener valores cercanos a 0,95 segundos, tiempo óptimo para percibir la palabra.

Reflectores detrás de la fuente

La otra solución recomendada es la instalación de reflectores detrás y alrededor de la principal fuente sonora, que necesita ser reforzada y proyectada hacia el fondo del volumen de forma directa, sin rebotes en las paredes, que generan excesiva reverberación (y hasta eco flotante). Los reflectores podrían ser de madera muy lisa, y debieran colocarse constituyendo un pequeño ángulo con la fuente, de manera de proyectar hacia el fondo pero no lateralmente. También se debiera considerar la colocación de reflectores arriba de la fuente, inclinados lo suficiente para alcanzar la zona más alejada de la iglesia.

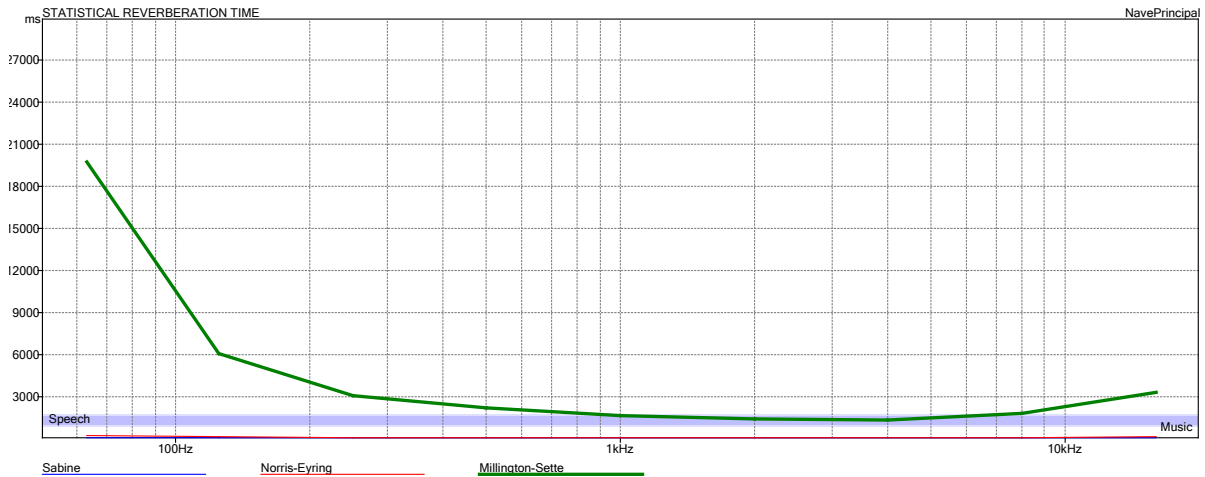


Figura 12. Tiempos medios de reverberación calculados con absorción en las paredes.

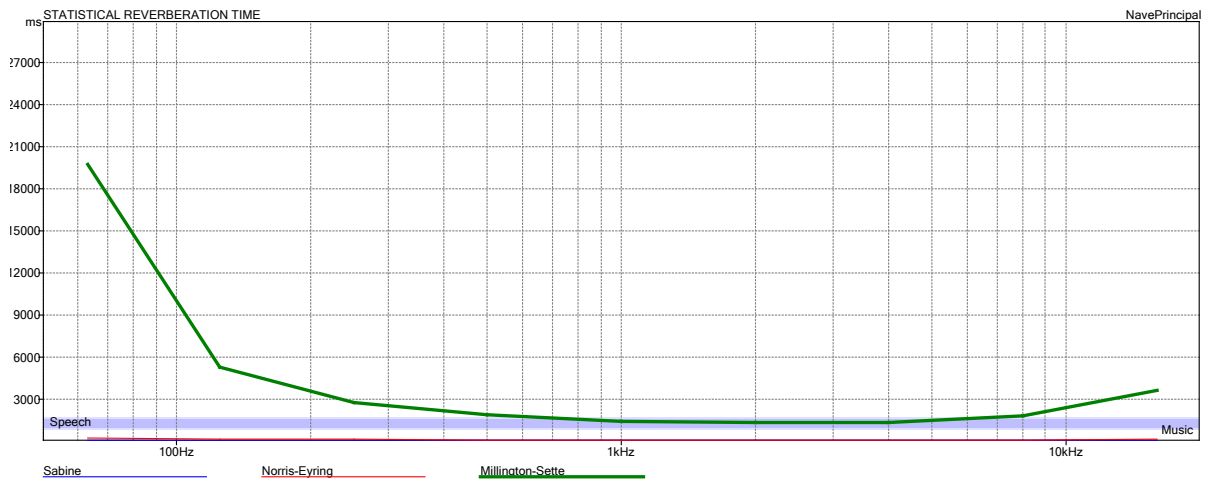


Figura 13. Tiempos medios de reverberación calculados con absorción en el techo.

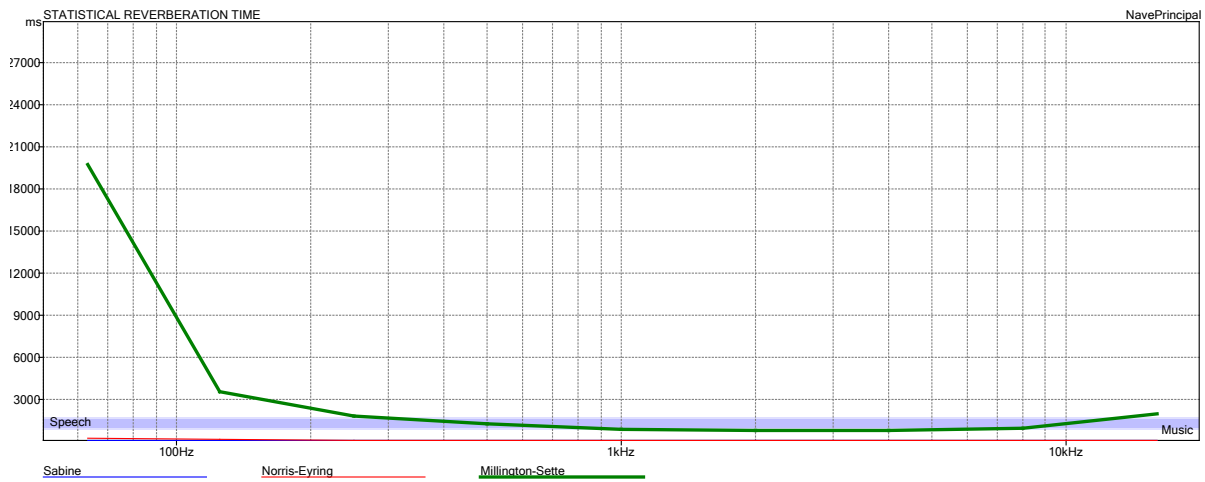


Figura 14. Tiempos medios de reverberación calculados con absorción en las paredes y el techo.

REGISTRO FOTOGRÁFICO PUESTA EN SERVICIO DEL ÓRGANO INDIANO

Texto de la invitación al Primer Concierto: La restauración del órgano indiano de 250 años aproximados de antigüedad ha sido ejecutada por el maestro organero Carlos Valdebenito y financiada parcialmente por Gobierno Regional de Antofagasta, Municipalidad de San Pedro de Atacama y Fondo del Fomento de las Artes FONDART del Consejo Regional de la Cultura y las Artes Antofagasta. El instrumento sonará luego de 120 años de silencio y tocará en conjunto con la orquesta Syntagma Musicum un concierto de música colonial americana en el coro del templo restaurado que se abrirá a la comunidad el 27 de junio para la celebración de su santo patrono San Pedro.



Figura 15. Izquierda: trabajo del Organero Carlos Valdebenito en el altillo del coro de la Iglesia de San Pedro de Atacama en el mes de Julio de 2015. Derecha: ajustes en el sistema de clavijero del órgano (Crédito: Alfaro, 2015)



Figura 16. Izquierda: afiche del primer concierto del órgano luego de su proceso de restauración. Derecha: noche del concierto del 27 de junio de 2015. (Créditos: Fundación Altiplano; Alfaro, 2015)

CONCLUSIONES

El relevamiento mediante el uso de tecnología 3D permitió obtener la nube de puntos y modelar la malla tridimensional del cuerpo del espacio de la Iglesia en su fase de terminaciones, con ello se obtuvo el registro y la información del estado actual de la Iglesia, las deformaciones de los muros y la real geometría de los elementos arquitectónicos y el mobiliario principal del edificio, determinando con exactitud su influencia sobre el comportamiento acústico del espacio, análisis que se desprendió de los dibujos en corte y representaciones isométricas obtenidos del inmueble. Conocer los tamaños de cada uno de los elementos, estructurales, arquitectónicos, que posibilitaron el diagnóstico y análisis mediante el uso de softwares capaces de procesar datos que arrojar un modelamiento, en este caso, de interés acústico, que permita establecer las mejores estrategias para la rehabilitación funcional del templo y proponer estrategias remediales para mejorar las condiciones acústicas del edificio.

Las construcciones en tierra cruda pueden presentar un comportamiento acústico muy reverberante, especialmente cuando las superficies interiores son muy lisas, como es el caso de la iglesia de San Pedro. Obviar este comportamiento no es cosa sencilla si se quiere preservar la estética de la construcción: la más obvia estrategia de acondicionamiento correspondería a la colocación de materiales absorbentes en las paredes, combinando esta intervención con la puesta en obra de paneles de reflexión en el techo para dirigir el sonido hacia el fondo. Si se busca preservar la apariencia original de las paredes y también las vigas a vista en el techo, se sugiere intervenir con el mobiliario, la decoración y la colocación de paneles móviles, tanto absorbentes como reflectores, para ser utilizados según más convenga en función del aforo al espacio y la ubicación de las fuentes sonoras. La propuesta de instalación de altavoces, se considera no adecuada, porque incrementaría el sonido directo (intervención que no es necesaria) sin llegar a resolver el problema del fondo, es más podría causar solamente más distorsión en el sonido debido a la reverberación del ambiente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arau, I. (2012). Increasing the acoustic volume of performance spaces without altering the internal dimensions. *Acta Acustica united Acustica*, Vol 98, p. 309-316.
- Flores, M. D.; Ferreyra, S.P.; Cravero, G. A.; Budde, L.; Longoni, H. C.; Ramos, O. A.; Tommasini, F. A. (2013). Base de datos de coeficientes de absorción sonora de diferentes materiales. *Mecánica Computacional* Vol. XXXII, p. 2901-2908.

Fundación Altiplano, (2014): Proyecto de restauración de la Iglesia de San Pedro de Atacama. <http://restaurasanpedro.cl/proyecto.php>

Marsh, A. (2000). Ecotect Manual.

Neila, J. (2008). Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible. Munilla-Lira Ed. Madrid

Núñez, Lautaro, González, J. y Galeno, C. (2010). Rescate del patrimonio material más antiguo de la región de las iglesias precordilleranas a los templos urbanos. Ediciones Fondo Nacional de Desarrollo Regional, F.N.D.R., 2% Cultura, Año 2009. CORE, II Región Antofagasta.

Serra, R; Coch, H. (1998). Arquitectura y energía natural. UPC Ediciones, Barcelona.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Católica del Norte y a la Fundación Altiplano

AUTORES

Sergio Alfaro es Arquitecto por la Universidad Católica del Norte y Doctor en Proyectos de Innovación Tecnológica por la Universidad Politécnica de Cataluña, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona. Sus líneas de investigación incluyen evaluaciones de impacto ambiental y huella de carbono, desarrollo de nuevas tecnologías de producción, reutilización y reciclaje de materiales, arquitectura para la emergencia, sistemas constructivos y estructurales tradicionales e innovadores, es integrante de la RED ARCOT, Arquitectura y Construcción en Tierra, Cátedra Unesco, en Chile, que agrupa a 8 Escuelas y Facultades de Arquitectura en Chile junto a la Fundación Jofré.

Massimo Palme es Ingeniero en Materiales por la Universidad de Trieste, Italia y Doctor en Arquitectura, Energía y Medioambiente por la Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España. Desde 2010 dicta la cátedra de "Luz y Sonido" para la carrera de arquitectura de la Universidad Católica del Norte. Conduce investigaciones en las áreas de la simulación de desempeño de edificaciones y del acondicionamiento ambiental de la arquitectura y los espacios urbanos.

Beatriz Yuste es Arquitecta por la Universidad Politécnica de Valencia, Magister en Arquitectura, energía y medio ambiente. Actualmente se desempeña profesionalmente como Arquitecta en la Restauración de la Iglesia de San Pedro de Atacama. Posee una trayectoria y experiencia profesional en el área de la Restauración desde 2011 con el Plan de restauración de iglesias andinas de Arica y Parinacota, a cargo de Fundación Altiplano, Chile.