Caracterización Acústica de la Capilla Abierta del Antiguo Convento de San Nicolás de Tolentino en Actopan, Hidalgo, México. - Un ejemplo de resignificación patrimonial regional -

García Alonso, EduardoJavier
Doctor en Arquitectura por la Universidad Autónoma de Aguascalientes. Profesor de la Escuela de Arquitectura y Diseño de América Latina y el Caribe, ISTHMUS – Ciudad del Saber Panamá y Chihuahua, México; catedrático del Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM) –Campus Hidalgo. <eduardo.alonso@itesm.mx>.

Furet Hernández, RonaldHans
Ingeniero Civil en Sonido y Acústica con el grado académico de Licenciado en Ciencias de la Ingeniería, otorgados por la Universidad Tecnológica de Chile. Actualmente es consultor independiente en ingeniería acústica, y director académico de la escuela de sonido Bunker Audio y gerente técnico en Sonologica Consulting, ambas instituciones en México D.F. Sus líneas de investigación y desarrollo tecnológico están orientadas a la acústica ambiental, acústica arquitectónica, y control de ruido y vibraciones en la industria.<ronald.furet@gmail.com>

Acosta Collazo, Alejandro
Doctor en Arquitectura. Adscrito a la Universidad Autónoma de Aguascalientes, Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción. Departamento de Diseño del Hábitat, México. <aacosta@correo.uaa.mx>.

Resumen
En el presente documento se estudia el desempeño acústico de la capilla abierta del ex convento de San Nicolás de Tolentino, situado en el municipio de Actopan del estado de Hidalgo, México. Se explica a través de modelaciones acústicas, como en aquella época podían conseguir un mayor nivel de presión sonora a una mayor distancia para transmitir el mensaje religioso a una gran multitud de feligreses. Colateralmente se hace un breve análisis historiográfico de la función primaria de la capilla abierta, que es complementado con este análisis de acústica, permitiéndonos plantear nuevos horizontes de estudio para este género de edificios patrimoniales en la región.

Palabras clave
Arquitectura, acústica, convento, agustinos.

Acoustics Characterization of the Open Chapel´s St. Nicholas of Tolentino Ancient Monastery at Actopan, Hidalgo, Mexico. - An example of regional heritage resignification -

Abstract
This paper summarizes the study of the acoustic behavior of the opened chapel from the “ex convento de San Nicolás de Tolentino”, located in the municipality of Actopan, state of Hidalgo, in Mexico. Such behavior is explained through the acoustic modeling; how at the time, a higher sound pressure level could be attained to cover a longer distance enabling to transmit the religious message to a multitude of parishioners. A collateral and brief historiographic analysis is made about the main function of the opened chapel, and has been complemented with this acustic analysis allowing us to pose new research horizons for this type of heritage buildings at the region.

Keywords
Architecture, acoustic, monastery, agustinians.

GARCÍA ALONSO, Eduardo Javier; FURET HERNÁNDEZ, Ronald Hans; ACOSTA COLLAZO, Alejandro. Caracterización Acústica de la Capilla Abierta del Antiguo Convento de San Nicolás de Tolentino en Actopan, Hidalgo, México. Un ejemplo de resignificación patrimonial regional. **Labor & Engenho**, v.8, n.2, 2014. Campinas [SP], Brasil. Disponível em: <www.conpadre.org> e <www.labore.fec.unicamp.br>.

Introducción

En la región conocida como “Valle del Mezquital” ubicada en el estado de Hidalgo, existen extraordinarios ejemplos de arquitectura monástica novohispana del siglo XVI, particularmente pertenecientes a las órdenes franciscana y agustina. Se destacan por su tamaño y calidad arquitectónica el ex convento de San Miguel Arcángel en el municipio de Ixmiquilpan y el de San Nicolás de Tolentino en Actopan. Este último es el más conocido debido a su extraordinaria belleza, siendo uno de los más estudiados localmente desde el enfoque histórico, religioso y artístico.

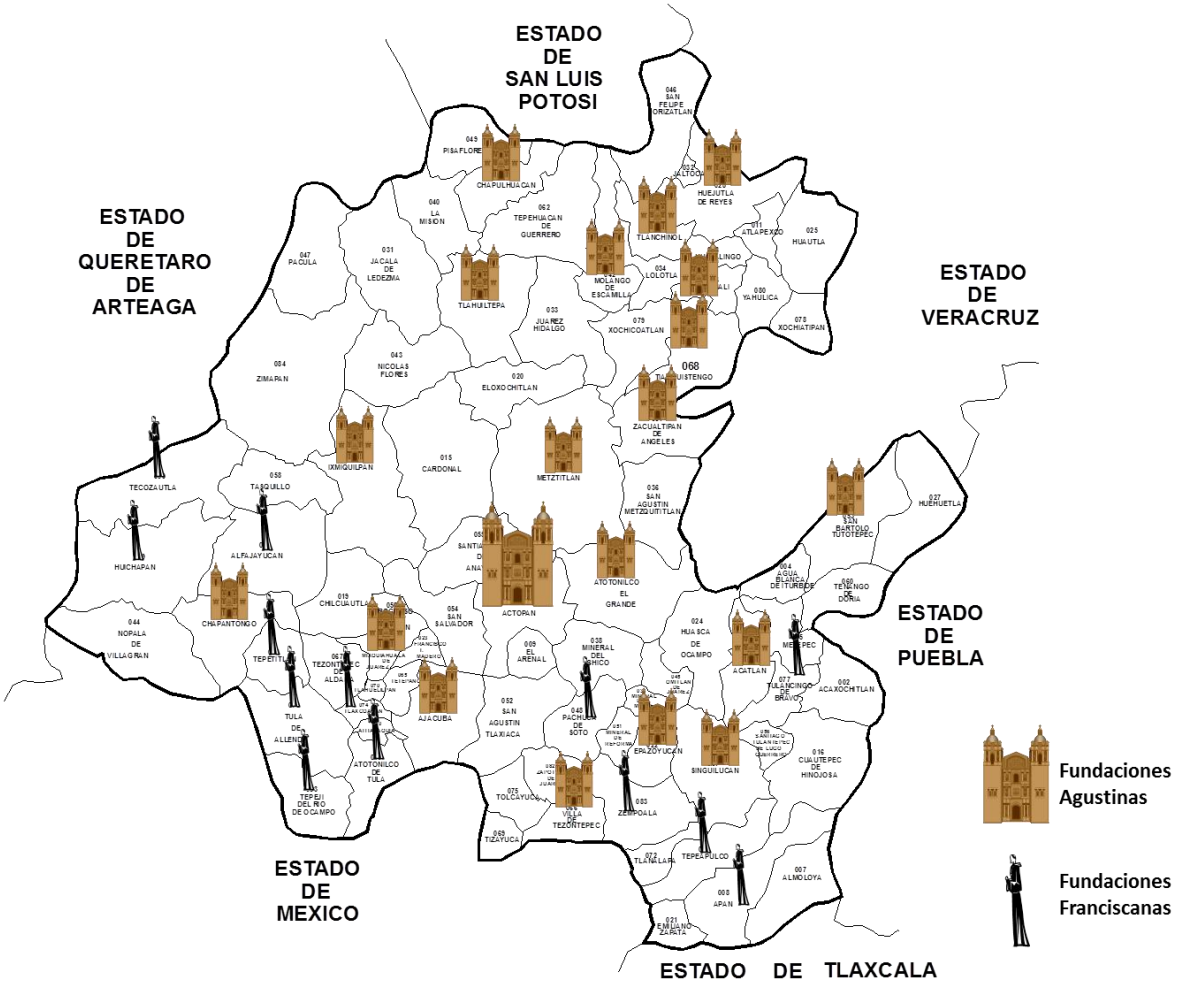

Figura 1. Distribución geográfica de los conventos en el estado de Hidalgo (gráfico realizado con datos del Dr. Víctor Manuel Ballesteros García y adaptado porEduardo J. García Alonso).

El convento de Actopan fue producto de la expansión evangelizadora de la orden mendicante de los agustinos en el actual territorio hidalguense, a mediados del siglo XVI. Se considera como fecha de su fundación el año de 1548, y su construcción es atribuida al prior fray Andrés de Mata, siendo concluido en 1573. Él murió en 1574 y el cronista de la orden agustina, Juan de Grijalva, reconoce su humildad y su gran capacidad por el hecho de haber construido los conventos de Ixmiquilpan y Actopan (Mac Gregor, 1982, pág. 41). De la

GARCÍA ALONSO, Eduardo Javier; FURET HERNÁNDEZ, Ronald Hans; ACOSTA COLLAZO, Alejandro. Caracterización Acústica de la Capilla Abierta del Antiguo Convento de San Nicolás de Tolentino en Actopan, Hidalgo, México. Un ejemplo de resignificación patrimonial regional. **Labor & Engenho**, v.8, n.2, 2014. Campinas [SP], Brasil. Disponível em: <www.conpadre.org> e <www.labore.fec.unicamp.br>.

formación del padre Mata no se conoce mucho, si acaso resalta su talento en la pintura, ya que había aprendido el oficio en Italia trabajando como ayudante de un maestro connotado. La formación de fray Andrés de Mata en Europa, y particularmente durante el efervescente cinquecento italiano, pone de manifiesto la plausible posibilidad de que el padre Mata se encontrará imbuido de un espíritu renacentista (Mac Gregor, 1982, pág. 40), el cual tiene como una de sus principales características, la interdisciplinariedad de las artes mayores.

Los conventos -no importando al orden que perteneciesen- estaban formados por un grupo de personas que convivían bajo un mismo techo y sus relaciones estaban reglamentadas por un régimen jurídico propio, por lo que el edificio que habitaban heredó la misma designación. En el libro El Convento Agustino y la Sociedad Novohispana (1533-1630), de Antonio Rubial García, se afirma que el vínculo establecido entre el convento con la sociedad a la que servía, propició que existieran dos tipos de conventos: las casas en pueblos de indios que se denominan "rurales", y las de villas y ciudades de españoles que se llamaban "urbanas". Siguiendo esta clasificación, el convento de Actopan correspondió al tipo rural.

Durante el periodo comprendido entre los años de 1540 y 1570, la fundación de conventos agustinos en la Nueva España, respondió a tres necesidades básicamente, según nos comenta Antonio Rubial García: reforzar la misión en los territorios anteriormente adquiridos por medio de nuevos conventos de ocupación; entrar hacia las zonas abandonadas por las otras órdenes, siguiendo las direcciones marcadas por las fundaciones de la época anterior; e, intercomunicar todas las zonas mediante misiones de enlace.

Los conventos de Ixmiquilpan y Actopan, según lo anteriormente referido, encuadran dentro de las fundaciones de enlace, ya que acortan la distancia entre las casas rurales en la región de la Sierra Alta de Hidalgo y las misiones franciscanas de Tlahuelilpan y Tula, así como con la Sierra Gorda de Querétaro. Sin embargo, cumplieron con otro propósito: la mayoría de las veces los conventos estaban dispuestos para albergar a no más de cinco frailes, pero en otras ocasiones, las casas rurales que contaban con medios suficientes para sustentar una gran comunidad y que contaban con un amplio edificio para alojarla, se empleaban para albergar noviciados y/o como casas de estudio. El noviciado tenía como principal característica la de agrupar a aquellas personas que pretendían ordenarse; y en los grupos de estudio, se preparaban para el sacerdocio los religiosos ya profesos en las áreas de gramática, artes y teología y, además lenguas indígenas.

Por las grandes dimensiones de los conventos de Actopan e Ixmiquilpan y por tener suficientes recursos para albergar y sostener a una numerosa comunidad de estudiantes, fueron elegidos entre otros para actividades académicas. En Ixmiquilpan, por ejemplo, se dedicó al estudio de la gramática (estudios menores) y en Actopan (junto con Yuririapundaro y Tiripitío) a las artes (consideradas como estudios mayores, incluyendo a la teología).

El número de alumnos varió según la época y la casa de que se tratara. Hasta 1570 no debió ser muy elevado pues Acolman, poseía en ese año únicamente dieciséis estudiantes y Yuririapúndaro doce. Desde fines del siglo XVI y principios del XVII, cada casa de estudio tenía entre veinte y veinticinco alumnos. Actopan e Ixmiquilpan llegaron a poseer hasta treinta en 1605.

GARCÍA ALONSO, Eduardo Javier; FURET HERNÁNDEZ, Ronald Hans; ACOSTA COLLAZO, Alejandro. Caracterización Acústica de la Capilla Abierta del Antiguo Convento de San Nicolás de Tolentino en Actopan, Hidalgo, México. Un ejemplo de resignificación patrimonial regional. **Labor & Engenho**, v.8, n.2, 2014. Campinas [SP], Brasil. Disponível em: <www.conpadre.org> e <www.labore.fec.unicamp.br>.

La vida de la comunidad religiosa se desarrollaba entre la práctica de la oración y la labor evangelizadora. El centro de la actividad dentro del convento era la oración en común que se hacía varias veces al día en el coro: laudes, vísperas, completas y maitines. Si bien la oración en común era una regla de la comunidad agustina, ésta no perdió en Nueva España su carácter eremítico. En algunos conventos rurales había lugares de recogimiento y soledad para los religiosos que querían, por algún tiempo, una vida de oración retirada del mundo, según nos hace referencia Rubial García (pág. 143; 1989).

En contraste con esa vida religiosa, aislada, austera y sombría, que las gruesas paredes de los conventos novohispanos del siglo XVI nos hacen suponer, los agustinos fueron señalados por autoridades eclesiásticas y civiles por realizar grandes, suntuosas y costosas construcciones en aquella época. Según Antonio Rubial García, uno de los primordiales motivos para esta opulencia era impresionar a los neoconversos, fortaleciendo así el cristianismo a través de los sentidos; otra, que los mismos indígenas se enorgullecían de tener un majestuoso convento y una gran iglesia; y por último, también incidió la necesidad de admitir a muchos frailes en los conventos.

Complementariamente al alarde arquitectónico del ex convento de Actopan, encontramos en éste escultura y pintura (características distintivas en la mayoría de los ejemplos de arquitectura agustina en la Nueva España), que juegan un rol crucial en los monasterios y templos. Estos elementos eran ornamentales, pedagógicos y litúrgicos. Las portadas de las iglesias, las pinturas y los retablos de sus interiores, las pinturas en las porterías y claustros bajos de los conventos, los ornamentos y piezas de orfebrería de sus sacristías, respondían al impulso de dar a los indígenas un ambiente que les complementara sus conocimientos sobre el cristianismo y que les facilitara, por medio de la magnificencia del culto, su acercamiento a Dios. Las pinturas en los claustros altos, en cambio, iban dirigidas más bien a los religiosos y se encaminaban no sólo a decorar, sino también a recordar a los frailes, estudiantes y viajeros, el espíritu en el que habían profesado (Rubial García, 1989, pág. 154 y 155).

Colateralmente a las artes visuales fueron utilizados otros medios didácticos y de conversión religiosa, como el teatro. No hay referencias de autos sacramentales escritos o inspirados por los frailes agustinos, no obstante, no es de extrañar que la orden haya utilizado la actividad teatral para la evangelización, siendo este un medio extremadamente persuasivo. De hecho las posadas, fiestas simbólico-teatrales, nacieron según la tradición, en el convento agustino de Acolman (Rubial García, 1990, pág. 154 y 155).

Uno de los escenarios por antonomasia que funcionó como escenario de estas actividades evangelizadoras, lo representa su capilla abierta. Espacio fisonómico del ex convento de San Nicolás de Tolentino que lo distingue por sus grandes dimensiones y su pintura al fresco del siglo XVI con motivos del antiguo testamento y escenas costumbristas. Su bóveda ricamente decorada con casetones pintados al fresco, tomados de los diseños del arquitecto italiano Sebastián Serlio, dibujados en su libro Reglas Generales de Arquitectura sobre los Cinco Estilos de Edificios (Ballesteros García; 1999; pág. 35); hacen que junto con sus extraordinarias proporciones (17.50 mts. de luz y 12 mts. de altura) y su contigüidad con la fachada norte de la iglesia y el mismo atrio, un espacio poderoso. Generando un efecto imponente al observador. Añade a esta descripción McAndrew (pág. 479), que el claro de la bóveda de la capilla abierta de Actopan es mayor que el de las catedrales de París, Amiens, Toledo o Sevilla; sobrepasa a todas las de España con excepción de la de Gerona. La

GARCÍA ALONSO, Eduardo Javier; FURET HERNÁNDEZ, Ronald Hans; ACOSTA COLLAZO, Alejandro. Caracterización Acústica de la Capilla Abierta del Antiguo Convento de San Nicolás de Tolentino en Actopan, Hidalgo, México. Un ejemplo de resignificación patrimonial regional. **Labor & Engenho**, v.8, n.2, 2014. Campinas [SP], Brasil. Disponível em: <www.conpadre.org> e <www.labore.fec.unicamp.br>.

elegancia y sobriedad del arco y las jambas sirven para disimular la pesantez de la estructura y dar una apariencia de ligereza que es apropiada con la escala de la iglesia.

Figura 2. Capilla abierta (17.50 metros de luz), ex-convento de San Nicolás de Tolentino en Actopan, Hidalgo, México (EJGA, 2010).

Es sabido que las capillas abiertas son una aportación arquitectónica única a la historia universal, y que fueron utilizadas como espacios de transición cultural para el culto religioso de espacios abiertos a cerrados. No obstante revisando a detalle la función primaria de estos espacios encontramos algunas aseveraciones que son ambiguas.

Por el ejemplo para el arquitecto Luis Corrales, las capillas abiertas (no solamente la de Actopan) sirven para celebraciones multitudinarias (2012; pág. 55). Por otra parte el Dr. Juan Benito Artigas afirma en su libro México, Arquitectura del Siglo XVI (2010; pág. 38), que las capillas abiertas son edificios para decir y oír misa. Por su parte el Dr. Chanfón Olmos (1997; pág. 339), asevera que las capillas abiertas son una especie de "telón de fondo", de "baldaquino de dignidad" para señalar la ubicación del rito importante frente a la multitud asistente, sin la cual no existe una verdadera "ceremonia". En un sentido similar George Kubler (1982; pág. 273), dice que las capillas abiertas permitían a la congregación reunida presenciar el culto desde afuera y que funcionaban como presbiterio y el atrio como nave.

Las capillas abiertas son el tema central de la obra de Jonh Mc Andrew, The Open-Air Churches of Sixteenth - Century Mexico; la cual cita en su noveno capítulo al Padre Mendieta quien afirma que todos monasterios en la Nueva España tenían atrios amurallados

GARCÍA ALONSO, Eduardo Javier; FURET HERNÁNDEZ, Ronald Hans; ACOSTA COLLAZO, Alejandro. Caracterización Acústica de la Capilla Abierta del Antiguo Convento de San Nicolás de Tolentino en Actopan, Hidalgo, México. Un ejemplo de resignificación patrimonial regional. **Labor & Engenho**, v.8, n.2, 2014. Campinas [SP], Brasil. Disponível em: <www.conpadre.org> e <www.labore.fec.unicamp.br>.

y que los nativos oían misa y el sermón dominical, presumiblemente desde una capilla abierta (Mc Andrew, Jonh; 1965; pág. 345). -No puede haber misa alguna sin altar- y no puede haber un altar en el atrio, sin protección de una capilla. La mayoría de los monasterios tenían la gran necesidad de contar con capillas abiertas por la expansión de las congregaciones de nativos, hasta por lo menos en 1576 que disminuyó la población por la plaga.

Citando textualmente a Fray Jerónimo de Mendieta (Libro Cuarto; Capítulo XXXII - Del modo que se tuvo en juntar los indios en las fiestas para su doctrina y para la misa, y el que ahora se tiene; pág. 341), nos dice:

> *Cuando llegaban al patio hacían oración al Santísimo Sacramento, arrodillados ante la puerta de la iglesia, y aunque no hiciese mucho frío, por ser de mañana hacían muchas hogueras de fuego, donde se calentaban los principales. La gente se iba asentando, los hombres en cuclillas (según su costumbre) por rengleras, y las mujeres por sí, y allí los contaban por unas tablas donde los tenían escriptos, y los que faltaban íbanlos señalando para darles su penitencia, que era media docena de azotes en las espaldas. Contados todos, levantábanse de allí y íbanse a asentar delante de la capilla donde se había de decir la misa y se les había de predicar, poniéndose los hombres todos a la parte del evangelio, y las mujeres a la de la epístola, y antes que se predicase el sermón, poníanse dos niños o dos mozos o viejos en pie (según lo que cada ministro tenía ordenado en su districto), de espaldas al altar y el rostro al pueblo palabra por palabra. Decíanla dos veces (si tardaba el predicador en subir el púlpito), aunque lo común era decirla una vez, y luego salía el predicador, y puesto en el púlpito que estaba aparejado, les echaba las fiestas o ayunos que había entre semana, y luego les predicaba una hora, antes menos que más, y acabado el sermón, inmediatamente se comenzaba la misa, y después de dicha se iban a sus casas; de suerte que todos los oficios se acababan entre las ocho y las nueve, antes que calentase el sol, salvo en las grandes festividades, que se celebraban con más solemnidad (Fray Jeronimo de Mendieta, 1870).*

Para Robert Ricard (2005; pág. 268) la capilla abierta fue un gran nicho, que evolucionó por un altar en forma que se le puso dentro. Ahí el sacerdote celebraba la misa y todos los fieles agrupados en el atrio podían verla. Él mismo cita a Fray Toribio de Motolinia (Libro I; Capítulo 34; págs. 92 y 93):

> *...y salen los indios señores y principales ataviados con sus camisas limpias y mantas blancas y labradas, con plumajes y piñas de rosas en las manos, bailan y dicen cantares en su lengua de las historias de las fiestas que celebran, que las han traducido los frailes en su lenguaje, y los maestros de sus cantares las han puesto a su modo en metro que cuadre y se cante al son de sus cantares antiguos; ... y tienen muchas lumbres en sus patios, que en esta tierra los patios son muy grandes y muy gentiles, porque la gente no cabe en las iglesias, y en los patios tiene su capilla para que todos oyan (sic.) misa los domingos y fiestas, y las iglesias sirven entre semana... (Fray Toribio de Motolinia, 1903).*

De las anteriores citas podemos percibir que existen dos funciones básicas de las capillas abiertas: la primera es que servían para ver y/o presenciar ceremonias religiosas por grandes multitudes; la segunda, es la relativa a que se empleaban para oír y en consecuencia sería deseable escuchar, que implica comprender o entender lo que se decía en esas ceremonias, también por grandes grupos de personas que eran el objetivo final de

GARCÍA ALONSO, Eduardo Javier; FURET HERNÁNDEZ, Ronald Hans; ACOSTA COLLAZO, Alejandro. Caracterización Acústica de la Capilla Abierta del Antiguo Convento de San Nicolás de Tolentino en Actopan, Hidalgo, México. Un ejemplo de resignificación patrimonial regional. **Labor & Engenho**, v.8, n.2, 2014. Campinas [SP], Brasil. Disponível em: <www.conpadre.org> e <www.labore.fec.unicamp.br>.

la labor evangelizadora del siglo XVI. Es curioso observar cómo se confunden estas funciones de la capilla abierta, infiriéndose que ambas se toman como sinónimo entre ellas mismas, y no como actos separados de la percepción humana. Si acaso son complementarias, pero no son iguales. Presenciar no es lo mismo que oír o escuchar. Podemos presenciar algún hecho de la realidad en silencio, comprendiendo lo que sucede solo observando. Sin embargo la efervescente actividad evangelizadora emprendida por las órdenes religiosas del siglo XVI, le era imprescindible la propagación de la palabra hablada.

De esta manera se plantearon las preguntas de la presente investigación: ¿La gran capilla abierta de Actopan es apropiada para escuchar, o solo sirvió para presenciar actos litúrgicos?, ¿Verdaderamente ayuda a la propagación de la palabra hablada para la adecuada recepción de grupos grandes de personas?, ¿O, efectivamente es un espacio de carácter visual, que solo fue útil como remate escenográfico de una ceremonia religiosa y sus importantes frescos pictóricos fueron los principales actores de la actividad evangelizadora?

Materiales y métodos

Cabe destacar que el análisis del comportamiento acústico en una capilla abierta, es algo poco explorado. Por lo tanto en este estudio, se pretendió hacer una aproximación en base a simulaciones computacionales, basadas en teorías descritas y comprobadas por otros autores. En una capilla abierta sería deseable como objetivo acústico conseguir un grado adecuado de comprensión de la palabra hablada o cantada en todos los puntos de la audiencia, sobre todo cuando en la audiencia hay un gran número de personas. Según Knudsen, la máxima distancia que puede llegar a ser entendido un mensaje hablado es de 42 m en la dirección frontal sobre su eje, 30 m hacia los costados y 17 m hacia la parte posterior, en una condición de ruido de fondo considerablemente baja y sin viento. De acuerdo a esta referencia, si se superan estas distancias, la palabra hablada no es inteligible ya que sería enmascarado por el ruido de fondo.

Tomando en cuenta la distancia máxima de 42 metros mencionada anteriormente en esa determinada situación, se requeriría hacer inteligible la palabra a una distancia superior a ésta, ya que la audiencia tendría la posibilidad de ocupar la totalidad del atrio (largo: 63.36 m; ancho: 36.28 m; superficie: 2,298.70 m2) que se encuentra frente a la capilla abierta. En esa época, lo más probable es que el ruido de fondo del lugar fuese muy bajo y la altura de las paredes protegiera de cierta manera la influencia del viento. Para poder lograr que el sonido sea inteligible a una mayor distancia, sin que sea enmascarado por el ruido de fondo a los 42 metros en un campo libre, teóricamente se necesitan reforzar las primeras reflexiones, para elevar naturalmente el nivel de presión sonora de la fuente y ampliar la distancia en que el ruido de fondo empezará a enmascarar el sonido emitido por la misma, pudiendo llegar así a una mayor cantidad de auditores. Como en ese entonces aún no existía apoyo electro acústico para reforzar el sonido, lo más probable es que la acción conjunta de la capilla abierta con su tímpano, hayan sido los elementos acústicos claves para reforzar estas reflexiones sonoras y generar un mayor nivel de presión sonora en la audiencia con base en su forma y materiales reflectantes, que en su conjunto forman una especie de caja de resonancia reforzadora del sonido, con la función de lograr que el sonido se propague de forma inteligible a una mayor distancia y cubriendo más áreas de la audiencia simultáneamente.

Por otra parte, la fachada lateral norte de la nave principal que delimita el ábside y es adyacente a la capilla abierta, está compuesta con los contrafuertes de la bóveda de la iglesia. Estos elementos estructurales equidistantes entre sí, brindan una superficie rítmica que alternan los planos de la fachada en profundidad, sirviendo así para reflejar el sonido y reforzar las primeras reflexiones con una dispersión horizontal a lo a lo largo de la audiencia. Su simetría y posicionamientos en saliente, hacen pensar que colateralmente a su función primaria estructural, emula una especie de amplificador y difusor gigante, esparciéndolo de mejor manera en la audiencia.

Figura 3. Capilla abierta, atrio y contrafuertes en la fachada lateral (Norte) de la nave principal del ex convento de San Nicolás de Tolentino en Actopan, Hidalgo, México (EJGA, 2011).

El método que se utilizó para caracterizar la acústica de la capilla abierta, se basa en modelaciones acústicas que permiten obtener resultados objetivos, sin realizar procedimientos experimentales in-situ y proporcionando información válida para futuras investigaciones que pueden incluir mediciones empíricas, que profundicen y corroboren los resultados expuestos en esta investigación.

Las simulaciones fueron realizada con el software CATT - Acoustic v8, el cual sirve para predecir el comportamiento acústico de cualquier espacio delimitado por un volumen específico. Estas modelaciones, se apoyan en el método de predicción acústica basado en el trazo de rayos de acústica geométrica dentro de un volumen determinado, descrito por Dalënback (A new model for room acoustic prediction and auralization, PhD. Tesis, 1995).

Para poder realizar la simulación acústica, se inició elaborando un levantamiento volumétrico de la capilla abierta y atrio, con el software de diseño AutoCAD 2011. En modelaciones acústicas para recintos, es necesario acotar la geometría del espacio a

GARCÍA ALONSO, Eduardo Javier; FURET HERNÁNDEZ, Ronald Hans; ACOSTA COLLAZO, Alejandro. Caracterización Acústica de la Capilla Abierta del Antiguo Convento de San Nicolás de Tolentino en Actopan, Hidalgo, México. Un ejemplo de resignificación patrimonial regional. **Labor & Engenho**, v.8, n.2, 2014. Campinas [SP], Brasil. Disponível em: <www.conpadre.org> e <www.labore.fec.unicamp.br>.

configurar y en el caso de que existan superficies abiertas, se les debe asignar el máximo valor del coeficiente de absorción acústico, igual a uno, como lo indican varios autores tales como Llinares, Llopis y Sancho (Acústica Arquitectónica y Urbanística, 2011), simplemente porque no existe energía acústica reflejada en dicha superficie.

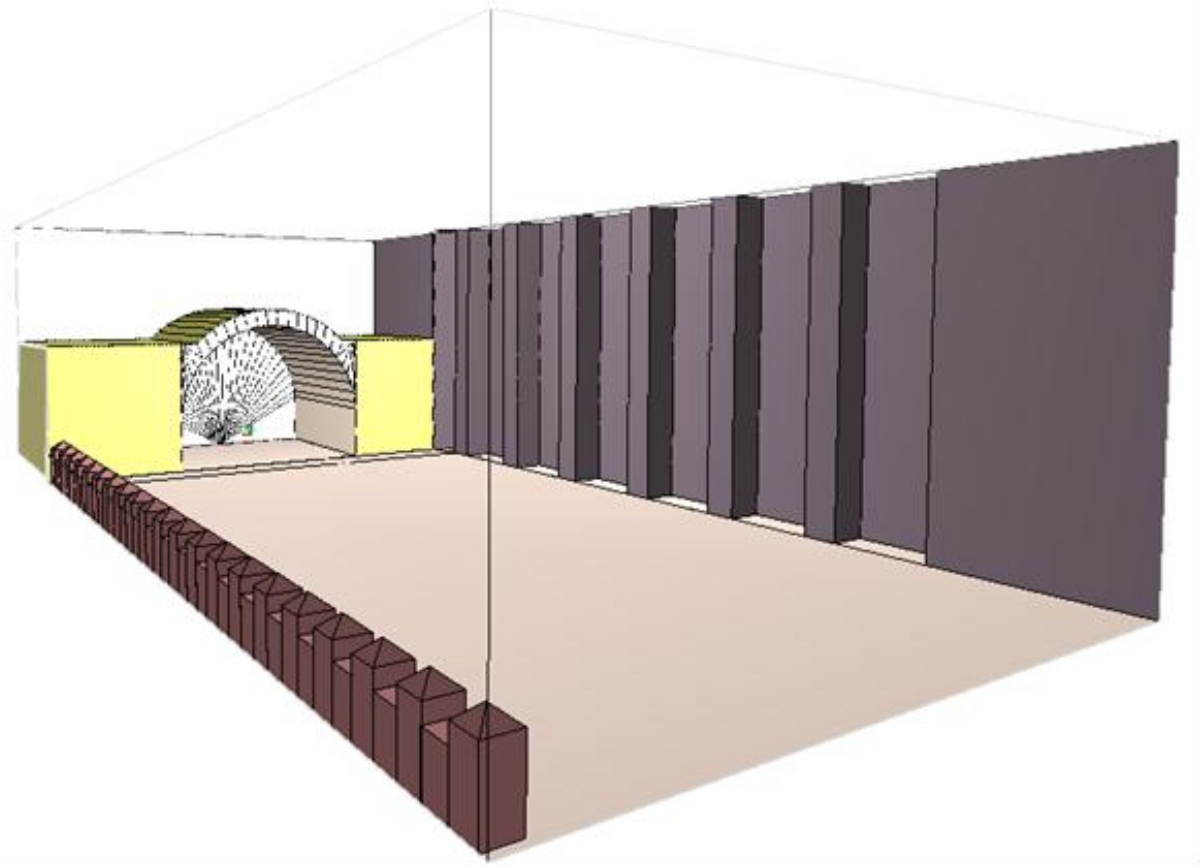

Figura 4. Modelo acústico en 3D dibujado en AutoCAD y renderizado en CATT-Acoustic; Ronald Hans Furet Hernández, Paulette Escalona Muñoz, Rodrigo Nava Sánchez y Gerardo García Serrano; agosto, 2013.

GARCÍA ALONSO, Eduardo Javier; FURET HERNÁNDEZ, Ronald Hans; ACOSTA COLLAZO, Alejandro. Caracterización Acústica de la Capilla Abierta del Antiguo Convento de San Nicolás de Tolentino en Actopan, Hidalgo, México. Un ejemplo de resignificación patrimonial regional. **Labor & Engenho**, v.8, n.2, 2014. Campinas [SP], Brasil. Disponível em: <www.conpadre.org> e <www.labore.fec.unicamp.br>.

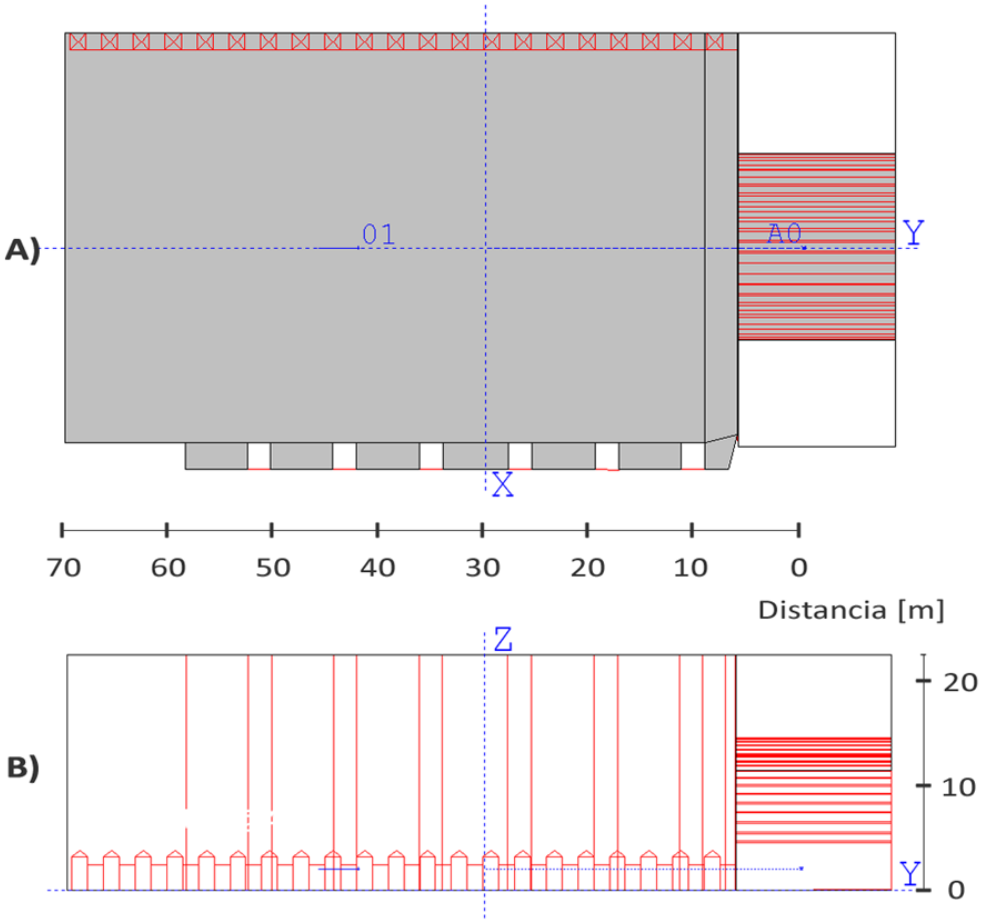

Figura 5. Planta arquitectónica y elevación de la capilla abierta y atrio, ex convento de San Nicolás de Tolentino, Actopan; Ronald Hans Furet Hernández, Paulette Escalona Muñoz, Rodrigo Nava Sánchez y Gerardo García Serrano; agosto, 2013.

Adicionalmente, se recurrió a la norma ISO 9613-2 para apoyar los resultados, específicamente a su séptima ecuación, la cual indica el método de cálculo para obtener la atenuación en decibeles producida por la distancia a medida que el sonido se aleja de la fuente:

Ecuación para la Atenuación producida por la divergencia geométrica para una fuente sonora puntual en campo libre.

$$A_{DIV} = 20 \cdot LOG\left(\frac{d}{d_0}\right) + 11 \quad [dB]$$

d: distancia que hay desde la fuente al receptor; d0: distancia de referencia, generalmente es 1 [m].

Por otra parte, las fuentes utilizadas en la modelación son voces humanas, a las cuales se les asignó un nivel de presión sonora específico para cada banda de frecuencia. Estos valores se pueden ver en el cuadro número 1, donde se muestra la densidad espectral promedio de la palabra por bandas de octava a una distancia de un metro. Esta información fue obtenida de la norma ANSI S1.79 para voces masculinas y femeninas a un volumen de voz elevado, como debería ser en el caso de una misa con gran audiencia y sin refuerzo electro acústico.

GARCÍA ALONSO, Eduardo Javier; FURET HERNÁNDEZ, Ronald Hans; ACOSTA COLLAZO, Alejandro. Caracterización Acústica de la Capilla Abierta del Antiguo Convento de San Nicolás de Tolentino en Actopan, Hidalgo, México. Un ejemplo de resignificación patrimonial regional. **Labor & Engenho**, v.8, n.2, 2014. Campinas [SP], Brasil. Disponível em: <www.conpadre.org> e <www.labore.fec.unicamp.br>.

Frecuencia [Hz]	125	250	500	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Nivel [dB]	58.0	64.0	70.3	70.7	65.9	59.9

Cuadro 1. Densidad espectral promedio de la palabra por bandas de octava.

Nota: La banda de frecuencia de 125 Hz, no está definida en la norma. Sin embargo, para propósitos de cálculo se asignó como un nivel de presión 6 dB inferior a la octava siguiente.

Para configurar la directividad de la fuente en el software, se utilizó como referencia la voz de un cantante inclinado 25 º respecto a su eje frontal. Los siguientes gráficos polares nos muestran la directividad horizontal y vertical cada 15º para las bandas de octava entre 125 Hz y 4 kHz.

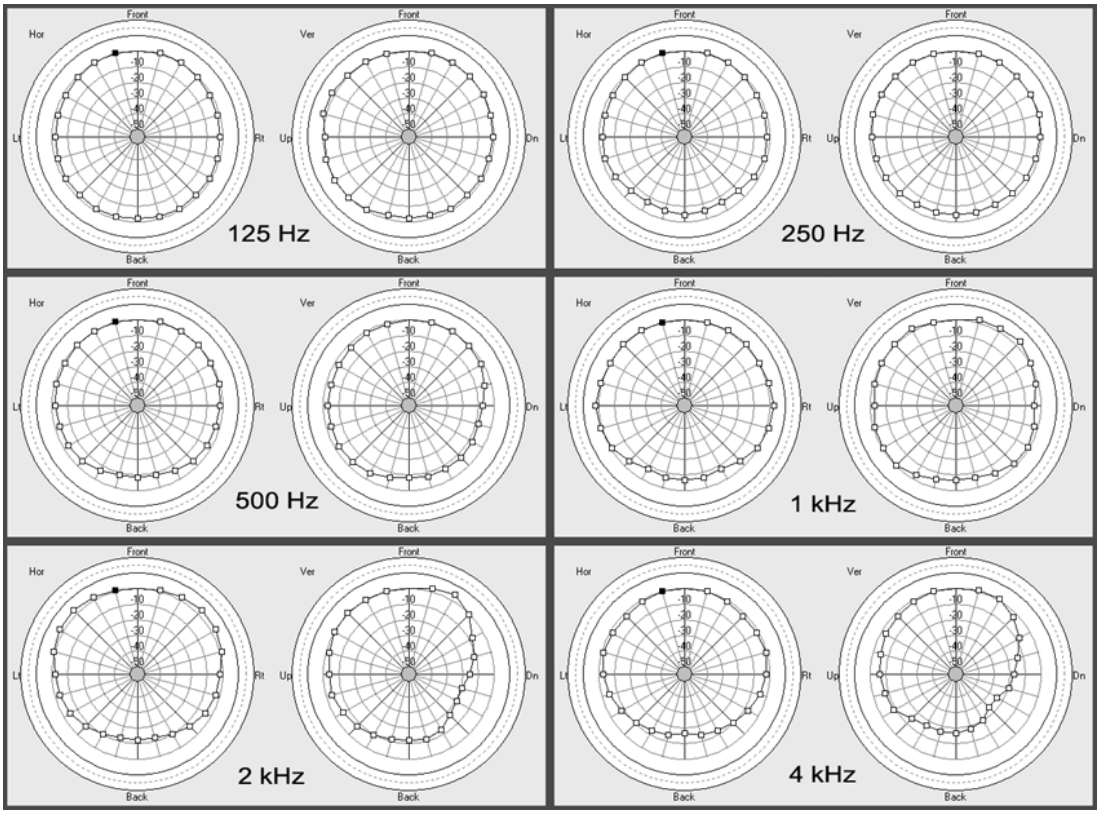

Figura 6. Directividad de la voz humana para un cantante, según Marshall y Meyer; Ronald Hans Furet Hernández; marzo, 2013.

Hasta el momento de la realización de ésta investigación, no se cuenta con registros bibliográficos acústicos de los materiales utilizados en la construcción de la capilla abierta, debido a que no son materiales actualmente comunes, por lo tanto, se han utilizado materiales de referencia con propiedades acústicas similares, de tal manera que se puedan obtener resultados más aproximados en las modelaciones. De hecho, debido a la poca información disponible de este tipo de materiales, podría dar cabida a otro tema de investigación específicamente relacionado con la absorción acústica de dichos materiales en diferentes tipos de templos religiosos. Los materiales básicos de referencia utilizados en la modelación y sus respectivos coeficientes de absorción acústica, son los siguientes:

GARCÍA ALONSO, Eduardo Javier; FURET HERNÁNDEZ, Ronald Hans; ACOSTA COLLAZO, Alejandro. Caracterización Acústica de la Capilla Abierta del Antiguo Convento de San Nicolás de Tolentino en Actopan, Hidalgo, México. Un ejemplo de resignificación patrimonial regional. **Labor & Engenho**, v.8, n.2, 2014. Campinas [SP], Brasil. Disponível em: <www.conpadre.org> e <www.labore.fec.unicamp.br>.

Frecuencia [Hz]	125	250	500	1 kHz	2 kHz	4 kHz	NRC
Aire	1	1	1	1	1	1	1
Muro de sillares de piedra	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.03

Cuadro 2. Coeficientes de absorción acústicos utilizados para la modelación acústica de la capilla abierta; Ronald Hans Furet Hernández; agosto, 2013.

Las condiciones ambientales acústicas utilizadas en la modelación incluyen una temperatura de 20ºC, humedad relativa del aire de 50%, densidad del aire de 1.2 [Kg/m3] y un nivel de ruido de fondo, que se especifica en el siguiente cuadro:

Frecuencia [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Nivel de Ruido de Fondo [dB]	45.0	38.0	32.0	28.0	25.0	23.0	21.0	19.0

Cuadro 3. Niveles de ruido de fondo en decibeles utilizado para el cálculo de STI; Ronald Hans Furet Hernández; agosto, 2013.

Resultados.

Para realizar las modelaciones, se utilizaron 125,615 rayos por banda de octava con un tiempo de truncado de 797 ms. Los pasos en el mapa fueron de 1 m, con una altura de 1.5 m para la zona donde eventualmente se situaba la audiencia. Para el sonido directo fue considerado el efecto de la fase y un nivel de presión sonora total con una curva de ponderación (A), con todas las bandas frecuencia de octava entre 125 Hz y 4 kHz. A continuación se muestra en planos, los resultados de las modelaciones. La primera figura, grafica claramente las importantes diferencias de nivel de presión sonora que ocurren cuando un orador esta en campo libre, respecto a cuándo está rodeado de elementos y formas reflectantes, ya sea en el mismo presbiterio, o hacia lo largo de la audiencia.

GARCÍA ALONSO, Eduardo Javier; FURET HERNÁNDEZ, Ronald Hans; ACOSTA COLLAZO, Alejandro. Caracterización Acústica de la Capilla Abierta del Antiguo Convento de San Nicolás de Tolentino en Actopan, Hidalgo, México. Un ejemplo de resignificación patrimonial regional. **Labor & Engenho**, v.8, n.2, 2014. Campinas [SP], Brasil. Disponível em: <www.conpadre.org> e <www.labore.fec.unicamp.br>.

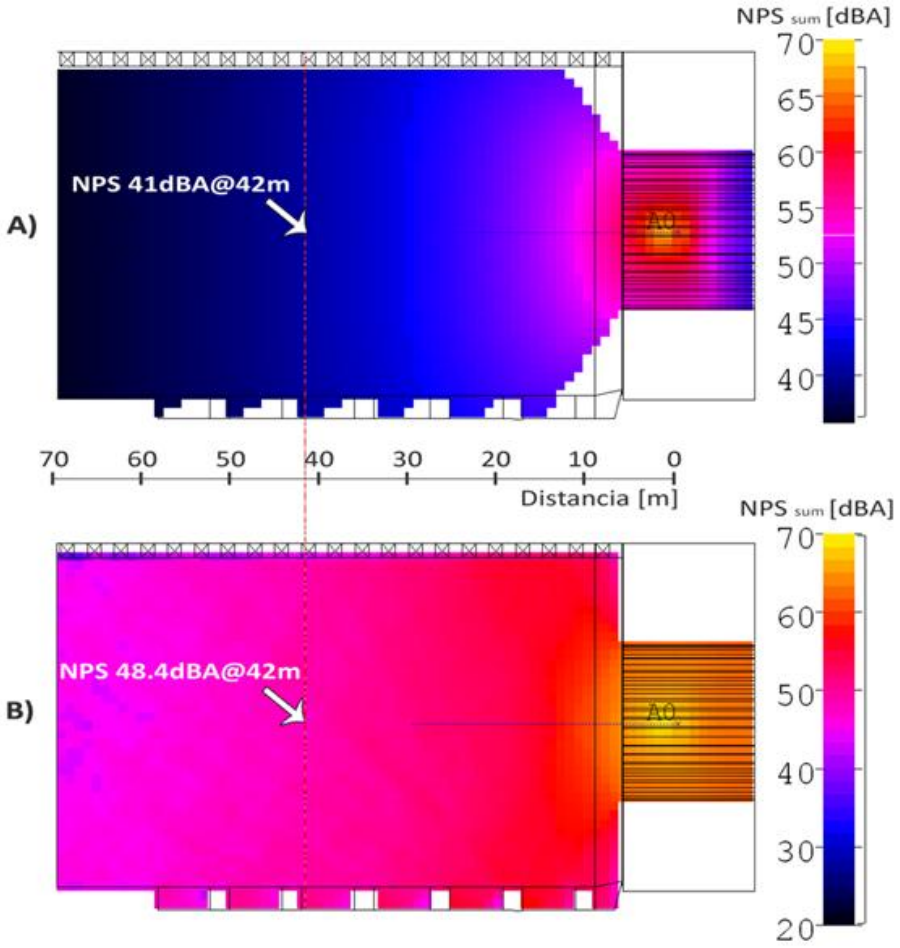

Figura 7. Modelación de Nivel de Presión Sonora en dBA de un orador, A) en campo libre, B) con capilla abierta, tímpano y contrafuertes laterales de la iglesia; Ronald Hans Furet Hernández; agosto, 2013.

Los resultados indican que los elementos y formas reflectantes de la modelación B), ayudan claramente a que el sonido llegue con mayor nivel de presión sonora a una mayor distancia que en la modelación A), situación benéfica para una capilla abierta en que se intenta hacer llegar de forma inteligible el mensaje religioso a los oídos de la multitud de feligreses. Knudsen considera que, a 42 metros en determinadas condiciones ya no sería inteligible el mensaje de la palabra (debido al ruido de fondo), el oyente ya no entendería la palabra en campo libre, como es el caso de la modelación A), en donde se considera en la simulación que no hay tímpano ni elementos reflectantes. En la figura 7 solo se esbozan como referencia para ubicar las distancias.

Si se realiza la suma energética de los niveles proporcionados por ANSI S1.79, se obtiene un Nivel de Presión Sonora (NPS) de 74.8 dB a un metro de la fuente. Si se quisiera, se puede convertir este valor a dB(A) utilizando la norma IEC 61672-1, así se obtiene 73.7 dB(A). Continuando con el análisis, según la ley de divergencia geométrica, la intensidad del sonido disminuye con el cuadrado de la distancia al centro de donde se origina, en otras palabras, el nivel de presión sonora decrece a razón de 6 dB por duplicación de la distancia, por lo tanto, a los 42 metros de la fuente se obtendría 42.4 dB o 41.3 dB(A) en campo libre según ISO 9613-2, tal como lo refleja la modelación A).

GARCÍA ALONSO, Eduardo Javier; FURET HERNÁNDEZ, Ronald Hans; ACOSTA COLLAZO, Alejandro. Caracterización Acústica de la Capilla Abierta del Antiguo Convento de San Nicolás de Tolentino en Actopan, Hidalgo, México. Un ejemplo de resignificación patrimonial regional. **Labor & Engenho**, v.8, n.2, 2014. Campinas [SP], Brasil. Disponível em: <www.conpadre.org> e <www.labore.fec.unicamp.br>.

Lo interesante ocurre en la modelación B), donde al orador se le sitúa dentro del ábside abovedado con su tímpano posterior, ya que en el mismo punto a 42 metros de la fuente, se produce un incremento de 7.4 dB(A) respecto al mismo punto en campo libre de la modelación A). Con esto, aumenta notoriamente la distancia a la que se reciben éstos mismos 48.4 dB, específicamente, va más allá de los 63 metros (límite longitudinal del atrio), situación que es notable en su comportamiento acústico.

También es remarcable que la situación B), cumple un excelente rol difusor del sonido, ya que los colores del gráfico son más uniformes en toda la zona de la audiencia y, el sonido va disminuyendo gradualmente a medida que aumenta la distancia. Por lo que se consigue una muy útil amplificación natural, permitiendo mejorar la relación señal-ruido, logrando hacer inteligible el mensaje hablado o cantado a una mayor distancia, sin que el ruido de fondo sea un problema en el área de audiencia. Con esto se logra una interesante difusión y amplificación natural del sonido.

GARCÍA ALONSO, Eduardo Javier; FURET HERNÁNDEZ, Ronald Hans; ACOSTA COLLAZO, Alejandro. Caracterización Acústica de la Capilla Abierta del Antiguo Convento de San Nicolás de Tolentino en Actopan, Hidalgo, México. Un ejemplo de resignificación patrimonial regional. **Labor & Engenho**, v.8, n.2, 2014. Campinas [SP], Brasil. Disponível em: <www.conpadre.org> e <www.labore.fec.unicamp.br>.

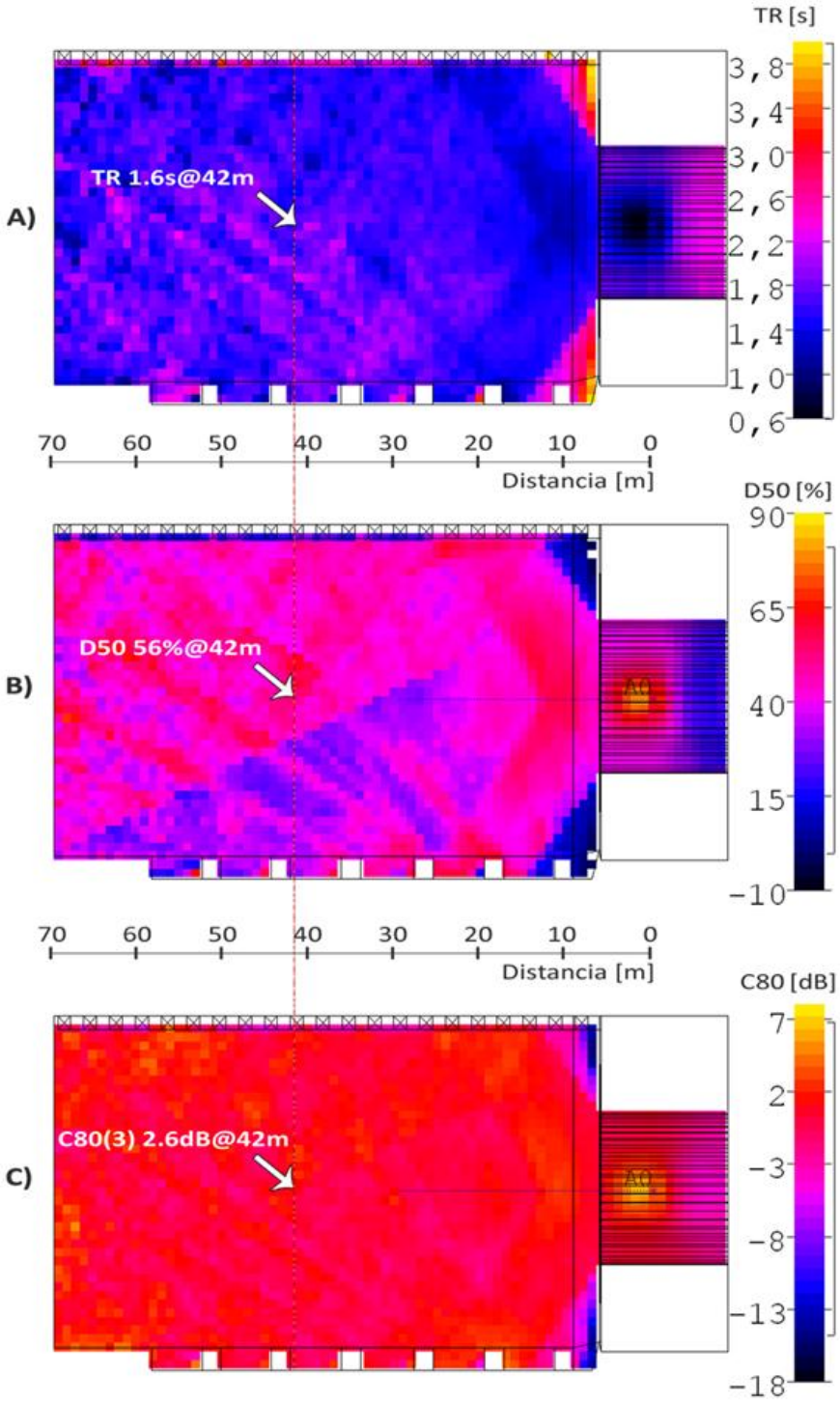

Figura 8. Modelación de: A) Tiempo de reverberación en segundos, B) Definición de la Palabra en porcentaje, y C) Claridad Musical en decibeles; Ronald Hans Furet Hernández; agosto, 2013.

Asimismo, los resultados reflejan la influencia notoria de las reflexiones producidas por los contrafuertes de la nave principal del Templo en el Tiempo de Reverberación (RT), circunstancia que produce un efecto perjudicial en la Definición de la Palabra (D_{50}) para ciertas áreas del público, específicamente en la diagonal inferior que cubre el área de

GARCÍA ALONSO, Eduardo Javier; FURET HERNÁNDEZ, Ronald Hans; ACOSTA COLLAZO, Alejandro. Caracterización Acústica de la Capilla Abierta del Antiguo Convento de San Nicolás de Tolentino en Actopan, Hidalgo, México. Un ejemplo de resignificación patrimonial regional. **Labor & Engenho**, v.8, n.2, 2014. Campinas [SP], Brasil. Disponível em: <www.conpadre.org> e <www.labore.fec.unicamp.br>.

audiencia que inicia desde la posición del orador en el centro de la capilla abierta, hacia el lado de los contrafuertes de la nave principal de la iglesia. No obstante, la Claridad Musical (C_{80}) se ve menos afectada por este fenómeno, ya que se tiene un comportamiento más homogéneo que la definición de la palabra.

Desde un punto de vista más objetivo, el T60 en el punto de recepción situado a 42 metros de la fuente en dirección longitudinal, es de 1.6 segundos. En tanto para el D_{50} se obtiene un valor de 56%, que se encuentra dentro de los valores recomendados. Por otra parte para el C_{80} (music average), se obtiene un valor de 2.6 dB que se traduce en que la claridad musical es ligeramente elevada respecto al margen de valores recomendados. En cuanto a la inteligibilidad de la palabra, se ha utilizado el método RASTI (*Room Acoustical Speech Transmission Index*), y sus resultados se presentan en la figura 9.

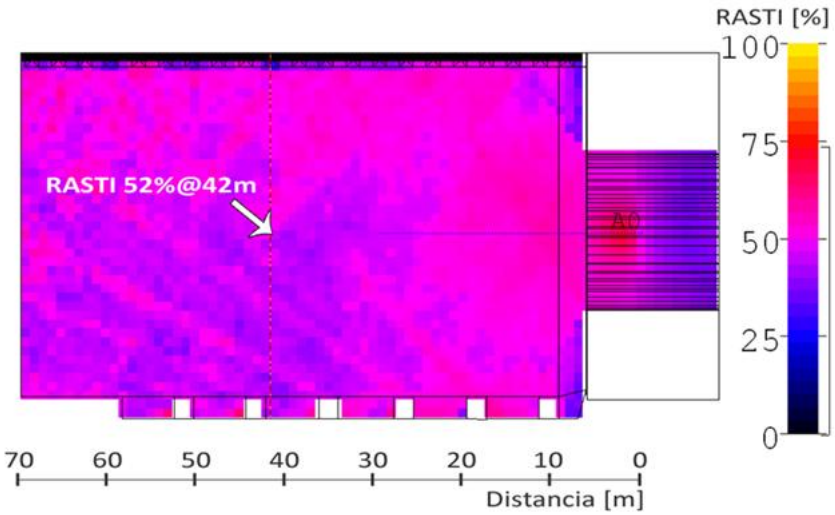

Figura 9. Modelación de inteligibilidad de la palabra con el método RASTI (*Room Acoustical Speech Transmission Index*); Ronald Hans Furet Hernández; agosto, 2013.

Como se puede observar en la gráfica anterior, el resultado de RASTI a los mismos 42 metros es de 51.8%, lo cual indica que posee una inteligibilidad de la palabra aceptable en el recinto, ver siguiente cuadro:

STI/RASTI	Inteligibilidad
0.88 – 1.00	Excelente
0.66 – 0.86	Buena
0.50 – 0.64	Aceptable
0.36 – 0.49	Pobre
0.24 – 0.34	Mala

Cuadro 4. Calificación del grado de inteligibilidad de acuerdo a los parámetros STI/RASTI; Ronald Hans Furet Hernández; agosto, 2013.

GARCÍA ALONSO, Eduardo Javier; FURET HERNÁNDEZ, Ronald Hans; ACOSTA COLLAZO, Alejandro. Caracterización Acústica de la Capilla Abierta del Antiguo Convento de San Nicolás de Tolentino en Actopan, Hidalgo, México. Un ejemplo de resignificación patrimonial regional. **Labor & Engenho**, v.8, n.2, 2014. Campinas [SP], Brasil. Disponível em: <www.conpadre.org> e <www.labore.fec.unicamp.br>.

Conclusiones

Las simulaciones construidas a partir de las dimensiones de la capilla abierta y contrafuertes de la nave principal de la iglesia, dieron una aproximación del comportamiento acústico del espacio abierto en su conjunto. Es importante señalar que toda modelación tiene un margen de error. Sin embargo, a través de éstas, se pudo comprender cómo se propaga el sonido en un medio y cómo se aprovechó el diseño original utilizando distintas formas y materiales.

La disposición geométrica de los elementos arquitectónicos con los cuales está construida la capilla abierta de Actopan y su correcta utilización de elementos reflectantes (bóveda de medio punto y tímpano) alrededor del orador, ayudan notoriamente a propagar el sonido hacia una mayor cantidad de personas, ya que no sólo refuerza naturalmente el nivel de presión sonora a lo largo del atrio, sino que también los niveles de presión sonora son distribuidos de una forma más homogénea a medida que se propaga con la distancia y, se atenúa gradualmente a través de toda la audiencia. Se destaca que el sonido llega a mayor distancia de una forma aceptablemente inteligible, comparando con el caso en que no hay elementos reflectores y difusores del sonido, tal y como se mostró en los resultados de las modelaciones.

Por otra parte, la definición de la palabra y la claridad musical, son mejores que la misma inteligibilidad de la palabra. Esto es debido al leve deterioro que produce la reverberación del recinto semi-abierto, lo que hace pensar que aunque no se entendiera el idioma, el detalle de la modulación y consonantes de las palabras, era muy relevante que se pudieran disociar las palabras y que se escuchara con claridad el mensaje musical. Lo anterior es debido a la notable amplificación natural que logra con las superficies reflectantes del recinto, sumado a que el sonido se atenúa con la distancia en una menor proporción que en campo libre, y que se produce una distribución mucho más homogénea en todo el recinto, pudiendo este diseño arquitectónico servir para cumplir con el objetivo de llegar de una forma más cercana, y con mayor volumen, a una mayor cantidad de feligreses.

Tomando en consideración estos análisis, se concluye que los elementos arquitectónicos que componen la capilla abierta del ex convento de San Nicolás de Tolentino, juegan un papel importante, no sólo de carácter plástico sino también acústico que favorecen celebrar, presenciar (ver), decir y escuchar eventos religiosos; ya que los resultados teóricos de la modelación acústica, avalan la intencionalidad acústica del presbiterio abovedado y aunque los contrafuertes de la nave principal no tienen la intención de servir como elementos acústicos, mejoran notablemente la comprensión del mensaje transmitido por la palabra hablada o musical para toda la audiencia. La utilización conjunta de estos elementos arquitectónicos (presbiterio abovedado y contrafuertes), ayudan a que el sonido sea reforzado en aproximadamente 7.4 dB más allá de dos terceras partes de la longitud del atrio, extendiendo notablemente la distancia a la cual el mensaje (oral o musical) se puede entender aceptablemente.

Los resultados obtenidos en la caracterización acústica de la gran capilla abierta de Actopan, corroboran las afirmaciones de: Corrales Vivar, “las capillas abiertas sirven para realizar celebraciones multitudinarias”; Artigas, “las capillas abiertas son edificios para decir y oír misa”; Chanfón Olmos, “las capillas abiertas son una especie de telón de fondo o baldaquino de dignidad, sin la cual no existe una verdadera ceremonia); Kubler, “las capillas abiertas permitían presenciar el culto desde afuera y funcionaban como presbiterio y el atrio como nave”; McAndrew y Mendieta, “atrios amurallados en los cuales los nativos oían misa

GARCÍA ALONSO, Eduardo Javier; FURET HERNÁNDEZ, Ronald Hans; ACOSTA COLLAZO, Alejandro. Caracterización Acústica de la Capilla Abierta del Antiguo Convento de San Nicolás de Tolentino en Actopan, Hidalgo, México. Un ejemplo de resignificación patrimonial regional. **Labor & Engenho**, v.8, n.2, 2014. Campinas [SP], Brasil. Disponível em: <www.conpadre.org> e <www.labore.fec.unicamp.br>.

y el sermón dominical, presumiblemente desde una capilla abierta"; Ricard, "en las capillas abiertas celebraban misa y los fieles podían verla desde el atrio"; y Motolonia, "en los patios tiene su capilla para que todos oyan (sic.) Misa los domingos y fiestas". No obstante a que todas estas aseveraciones son aplicables para la capilla abierta de Actopan, este estudio no puede generalizarse para el resto de las capillas abiertas existentes en otros sitios patrimoniales, como lo hacen los autores aquí citados. Particularmente, porque los contrafuertes del atrio de la iglesia cobran un papel preponderante en el desempeño acústico del atrio y se considera que estos elementos no tienen una intencionalidad de mejorar acústicamente el espacio, son elementos estructurales que no siempre están presentes en otros conjuntos conventuales.

Con este análisis se puede afirmar que la gran capilla abierta de Actopan, tiene una acústica arquitectónicamente intencionada, aportando de esta manera evidencia que corroboran hechos históricos referenciados ampliamente en el ámbito patrimonial. Como el Códice Franciscano, que dice: "es… muy necesario el ornato y aparato de las iglesias para levantarles el espíritu y moverles a las cosas de Dios… ha menester ser ayudado con la experiencia…"; o la afirmación de Zumarraga: "… los naturales… son muy dados a la música, y… en sus confesiones dicen que más por la predicaciones se convierten por la música…".

En congruencia con lo anterior, el presente estudio toma las referencias históricas como hipótesis susceptibles de comprobación científica, reduciendo su grado natural de subjetividad, inherente al ámbito histórico – patrimonial, aportando un factor más de interpretación para el fenómeno plástico – arquitectónico, el medio ambiente. Porque no importando la época histórica de la que se trate, las condiciones ambientales de la región geográfica del emplazamiento y la definición del propio hombre, inciden en la producción de su arquitectura, y en un sentido inverso complementario, la arquitectura induce el comportamiento social del hombre definiéndolo y determinando su relación con su ambiente. Es así que al profundizar en esta relación tridimensional (arquitectura - hombre - ambiente), se enriquecen los códigos históricos de la arquitectura, que permiten poner en perspectiva la relación del evangelizador con su ambiente, derivando así una resignificación de la arquitectura Novohispana, producto de las necesidades sociales del hombre y su ambiente regional.

Referencias

-AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **American National Standard Methods for the calculation of the speech Intelligibility Index. (ANSI S3.79-Draft)**. New York, 1993.
-ARTIGAS HERNÁNDEZ, J. B. **México -Arquitectura del Siglo XVI- (1a ed.).** México: Taurus, 2010.
-AUGUSTIN, S. **Regla de San Augustin y Constituciones de su Religión, Compendiadas y Traducidas del Latín en Castellano.** (J. Sanz, Ed.) Madrid, Castilla, España, 1719.
-BALLESTEROS GARCÍA, V.M. **Los Conventos del Estado de Hidalgo**. Universidad Autónoma del estado de Hidalgo, 2000.

GARCÍA ALONSO, Eduardo Javier; FURET HERNÁNDEZ, Ronald Hans; ACOSTA COLLAZO, Alejandro. Caracterización Acústica de la Capilla Abierta del Antiguo Convento de San Nicolás de Tolentino en Actopan, Hidalgo, México. Un ejemplo de resignificación patrimonial regional. **Labor & Engenho**, v.8, n.2, 2014. Campinas [SP], Brasil. Disponível em: <www.conpadre.org> e <www.labore.fec.unicamp.br>.

-BARRIGA MONROY, M. L. **La Educación Musical durante la Colonia en los Virreinatos de Nueva Granada, Nueva España y Río de la Plata.** El Artista: Revista de Investigaciones en Música y Artes Plásticas, 2006. (núm. 003) pp. 6-23.
-CHANFÓN OLMOS, C. **Historia de la Arquitectura y el Urbanismo Mexicanos (Vols. II - El Periodo Virreinal)**. México: Fondo de Cultura Económica, 1997.
-CORRALES VIVAR-CRAVIOTO, L. **Convento de San Nicolás de Tolentino, Actopan | Convento de San Miguel Arcángel, Ixmiquilpan**. Gobierno del Estado de Hidalgo, México, 2012.
-DE MENDIETA, F. J. **Historia Eclesiástica Indiana.** (J. García Icazbalceta, Ed.) México, 1870.
-DE MOTOLINIA, F. T. **Memoriales de Fray Toribio de Motolinia.** (J. García Icazbalceta, Ed.) México, 1903.
-JIMÉNEZ DIANDERAS, C. R. **Correlación entre Parámetros Acústicos Objetivos y Características Físico Arquitectónicas en Templos Católicos del Período Colonial en Ciudades Representativas del Perú.** Tesis Doctoral, Madrid, España. Universidad Politécnica de Madrid, 2010.
-KNUDSEN, V., HARRIS, C. **Acoustical Designing in Architecture, Acoustical Society of America.** Nueva York, 1950.
-KUBLER, G. **Arquitectura Mexicana del Siglo XVI.** (1a Edición en Español ed.). (R. de la Torre, G. de Garay, & M. Á. de Quevedo, Trads.). México: Fondo de Cultura Económica, 1982.
-MAC GREGOR, L. **Actopan.** Instituto Nacional de Antropología e Historia, México, 1982.
-MARSHALL A. H. and MEYER J. **Directivity and Auditory impression of Singers.** Acústica, 1985.v58, p. 130.
-MCANDREW, J. **The Open-Air Churches.** 2nd ed. Harvard, United States of America, 1969.
-RECUERO, M. **Ingeniería Acústica.** Editorial Paraninfo, 1999.
-RICARD, R. **La Conquista Espiritual de México (Ensayo sobre el apostolado y los métodos misioneros de las órdenes mendincantes en la Nueva España de 1523 - 1524 a 1572).** México: Fondo de Cultura Económica, 2005.
-RUBIAL GARCÍA, A. **El Convento Agustino y la Sociedad Novohispana (1533 - 1630).** Universidad Nacional Autónoma de México, 1989.

GARCÍA ALONSO, Eduardo Javier; FURET HERNÁNDEZ, Ronald Hans; ACOSTA COLLAZO, Alejandro. Caracterización Acústica de la Capilla Abierta del Antiguo Convento de San Nicolás de Tolentino en Actopan, Hidalgo, México. Un ejemplo de resignificación patrimonial regional. **Labor & Engenho**, v.8, n.2, 2014. Campinas [SP], Brasil. Disponível em: <www.conpadre.org> e <www.labore.fec.unicamp.br>.