

Estrategias antisísmicas de las iglesias del Altiplano andino chileno, cinco siglos resistiendo terremotos

Anti-seismic strategies of the churches of the Chilean Andean Altiplano, five centuries resisting earthquakes

José-Carlos Salcedo (*), Víctor Jiménez Barrado (**)

RESUMEN

En el Altiplano Andino existen en la actualidad centenares de pequeños edificios de estructura de fábrica, inicialmente construidos por la colonización española, que llevan hasta cinco siglos resistiendo terremotos en una de las zonas de mayor peligrosidad sísmica del planeta. La investigación se centra en el estudio de las iglesias de la región de Arica y Parinacota, actualmente perteneciente a Chile. Se trata de pequeñas iglesias de construcción típicamente española (funcional, formal y constructivamente) en las que se han venido introduciendo una serie de modificaciones estructurales clave. La sola constatación de su permanencia, pone de manifiesto que ha sido posible mejorar la vulnerabilidad sísmica de sus estructuras de fábrica. El propósito de este artículo es identificar cuáles han sido las estrategias sísmicas introducidas en América, a partir de un estudio pormenorizado de la geometría, materiales y sistemas estructurales de 30 de estas iglesias, contrastado con la tipología original en España.

Palabras clave: terremoto; Chile; estructura de fábrica; armadura de madera; iglesias españolas.

ABSTRACT

In the Andean Altiplano there are currently hundreds of small masonry structure buildings, initially built by the Spanish colonizers, which have been resisting earthquakes for up to five centuries in one of the most seismically dangerous areas on the world. The research focuses on the study of the churches of the Arica and Parinacota region, currently belonging to Chile. These are small churches of typically Spanish way of building (functional, formal and constructive) in which a series of key structural modifications have been introduced. The mere verification of its permanence shows that it has been possible to improve the seismic vulnerability of its masonry structures. The purpose of this article is to identify the seismic strategies introduced in America, based on a detailed study of the geometry, materials and structural systems of 30 of these churches, contrasted with the original typology in Spain.

Keywords: earthquake; Chile; masonry structure; timber structure; spanish churches.

(*) Dr. Arquitecto. Universidad de Extremadura, Escuela Politécnica, Cáceres (España).

(**) Dr. en Geografía. Departamento de Geografía de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (España).

Persona de contacto: jcsalcedo@unex.es.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7185-0286> (J.C. Salcedo); <https://orcid.org/0000-0001-7064-7465> (V. Jiménez)

Cómo citar este artículo/Citation: José-Carlos Salcedo, Víctor Jiménez Barrado (2022). Estrategias antisísmicas de las iglesias del Altiplano andino chileno, cinco siglos resistiendo terremotos. *Informes de la Construcción*, 74(568): e474. <https://doi.org/10.3989/ic.90706>

Copyright: © 2022 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Recibido/Received: 04/08/2021
Aceptado/Accepted: 09/04/2022
Publicado on-line/Published on-line: 12/12/2022

1. INTRODUCCIÓN

Es necesario investigar para desarrollar procedimientos adecuados de evaluación sísmica de ruinas patrimoniales y de diseño de intervenciones adecuadas para la prevención de derrumbes (1, 2).

Los últimos terremotos sucedidos en el Sur de Europa, como L'Aquila (2009) y Amatrice (2016) en Italia, y Lorca (2011) en España, han puesto de manifiesto que intervenir en los edificios históricos, presuntamente "reforzando" con hormigón y con acero no es la solución óptima. Es especialmente relevante la investigación publicada por Fortea y Salcedo en la revista *Informes de la Construcción* (3), que tras una novedosa metodología de estudio de los restos del terremoto inmediatamente después del evento sísmico, ha demostrado que los edificios históricos más dañados fueron precisamente los que habían sido intervenidos con hormigón y con acero modificando la masa y la rigidez de sus estructuras originales.

El objetivo de este trabajo es determinar qué estrategias anti-sísmicas han sido aplicadas históricamente de manera intuitiva a las estructuras de fábricas y de madera del patrimonio histórico y han resultado válidas, para poder aplicarlas a las estructuras actuales de muros con carácter general y, específicamente, a las intervenciones en el patrimonio construido.



Figura 1: Iglesia de la Inmaculada Concepción de Guallatire. Fotografías: Consejo de Monumentos Nacionales de Chile.



Figura 2: Izquierda, iglesia de la Inmaculada Concepción de Putani. Derecha, portada de la iglesia de San Bartolomé de Livilcar. Fotografías: Consejo de Monumentos Nacionales de Chile. Como se demostrará en este estudio, presentan una serie de aportaciones estructurales clave en su estructura histórica, que ha permitido su pervivencia.

Se había observado que las iglesias españolas en la zona sísmica del Altiplano chileno presentan unos rasgos externos característicos y diferenciadores (figuras 1 y 2), como la existencia de elevado número de contrafuertes ataluzados, el predominio de la horizontalidad (pequeña esbeltez) y cubiertas muy ligeras, evitando los más vulnerables sistemas de bóve-

das, pero no se sabía el porqué. El riesgo sísmico de Chile ha sido bien estudiado en el estado de la técnica (4) y en la normativa sísmica chilena, así como sus afecciones al patrimonio histórico. Pero es posible aportar más en este campo.

2. METODOLOGÍA

Se seleccionó para el estudio un área homogénea de alta peligrosidad sísmica en América, en la que existiera un suficiente número de realizaciones arquitectónicas de un tipo arquitectónico con el sistema estructural histórico que se quería analizar sísmicamente: estructura de fábrica y de madera.



Figura 3. Situación de la región chilena de Arica y Parinacota, en la cordillera andina, en relación a la histórica "Ruta de la Plata" entre Potosí y el puerto de San Marcos de Arica.

El estudio se centró en la región del Altiplano actualmente perteneciente a Chile, denominada "XV Región" o de "Arica y Parinacota", correspondiente a la demarcación religiosa de la Diócesis de San Marcos de Arica. Con un área de 17,0 km² (véanse mapas de las figuras 3 y 4). Un hecho histórico importante que articula esta región y su colonización en el s. XVI es la existencia de la "Ruta de la Plata americana".

La investigación sísmica adquiere mayor validez científica al comprobar que, del conjunto de las iglesias¹ del inventario de patrimonio cultural del país (5), las iglesias de Arica y Parinacota son las que se encuentran menos alteradas y más uniformemente repartidas en el territorio.

En un primer momento se geolocalizaron con un Sistema de Información Geográfica las 39 iglesias de las que se tenía conocimiento a partir de inventarios chilenos (6, 7).

Finalmente se realizó una selección de 30 de ellas, consultando estudios y publicaciones, especialmente los realizados por la Fundación del Altiplano (6). Hubo que añadir iglesias que no estaban en el inventario oficial y descartar otras, como las iglesias de San Miguel en Azapa, San Martín de Tours en

¹ Se realizó una primera lista de iglesias españolas patrimoniales en Chile, en la que destacaban por su antigüedad: San Francisco (1585, La Serena), San Francisco (1586, Santiago), Santo Domingo (1595, Santiago), San Jerónimo de Poconchile (1605, Arica), San Martín de Tours de Codpa (1618, Camarones), San José de Pachica (1618, Camarones), San Pedro de Esquiña (1618, Camarones), San Miguel Azapa (1660, Arica), San Ildefonso (1670, Putre), y de La Merced (1760, Santiago).



Figura 4. Situación de las 30 iglesias del Altiplano andino chileno seleccionadas para la investigación.

Chapoco y San Jerónimo en Poconchile, por ser iglesias nuevas o con grandes modificaciones sobre el sistema estructural primigenio.

Sobre las iglesias finalmente seleccionadas se ha elaborado:

- Un análisis gráfico de su sistema estructural (dibujo en planta de su estructura portante y sección constructiva).
- Un cuadro de características geométricas del sistema estructural.
- Y un cuadro de características de los sistemas constructivos y materiales.



Figura 5. Iglesia de Nuestra Señora del Rosario, en Barlovento, La Palma (1581). UTM 28R - 226465 mE 3192354 mN - 548 m. Es una de las pequeñas iglesias canarias de estructura de fábrica y entramado de madera utilizadas para comparar. Tiene planta con 9 m de ancho y 35 m de largo y una armadura de madera que sigue el tratado de López de Arenas. Fotografías: Ayuntamiento de Barlovento.

Método de comparación: para identificar los cambios estructurales, se ha contrastado con el sistema estructural original español y concretamente, no con las grandes iglesias españolas, sino con las pequeñas iglesias de una nave de las Islas Canarias (como la de la figura 5), por ser comparables con las chilenas objeto de estudio al ser todas ellas pequeñas de una nave, con armadura de madera y de las mismas fechas de construcción (del mismo estado de

la técnica) pero emplazadas en una zona sin alta peligrosidad² sísmica.

3. RESULTADOS

3.1. Geolocalización de las iglesias

La tabla 1 expresa el resultado del estudio de situación y geolocalización realizado. Es importante destacar la altitud del emplazamiento:

- Sólo 2 de las 30 iglesias (el 6,67%) se encuentran entre 1.000 y 2.000 m de altitud.
- 6 iglesias (el 20,00%) entre 2.000 y 3.000 m.
- 12 iglesias (el 40,00%) entre 3.000 y 4.000 m.
- 10 iglesias (el 33,33%) entre 4.000 y 5.000 m.

3.2. Estudio gráfico comparativo de las plantas.

Los planos de planta de estas 30 iglesias (se presentan reducidos a una escala que pueda ser publicada, partiendo de una escala inicial de estudio a E.1/100), han permitido tanto el estudio comparado de su geometría como la tipificación de su estructura portante de muros y contrafuertes.

Se ha podido constatar, como primera diferencia patente sobre la estructura histórica original española:

- La existencia en todos los casos de una nave única y estrecha. La anchura del presbiterio es la misma que la de la nave en todos los casos.
- La profusión de contrafuertes y capillas laterales dispuestos para rigidizar los muros de la nave, es decir, para dotarles de “resistencia fuera del plano”.

Para poder elaborar estos dibujos (unificación de escalas y criterio de representación para poder comparar) ha sido de gran ayuda la información gráfica del catálogo de Monumentos Nacionales de Chile (7), realizado a partir de la ley de patrimonio (5), y las publicaciones de la Fundación Altiplano (6), con planos muy elementales que, aunque estuvieran realizados con un objetivo de protección del patrimonio, han servido a este estudio para el análisis. Véanse figuras 6 y 7.

3.3. Estudio comparativo dimensional.

La tabla 2 es el resultado del estudio tridimensional de las estructuras. Se han expuesto, para las 30 iglesias objeto de estudio:

Las dimensiones de la planta y de la sección, la luz a ejes de apoyos en los muros de la estructura de cubierta, la pendiente de las cubiertas, y las esbelteces de los muros y proporciones de la planta. Para caracterizar los contrafuertes se han señalado la superficie útil (interior de las naves) y la construida, medidas estas últimas en la base (para incluir las dimensio-

² La peligrosidad sísmica de las islas Canarias es menor que la de la región chilena objeto de estudio. La máxima aceleración sísmica prevista (PSA) según el Mapa de Peligrosidad Sísmica de España del IGN es 0,07g para Tenerife.

Tabla 1. Geolocalización de iglesias del Altiplano chileno. Las 30 primeras son objeto de estudio, las nueve restantes son descartadas, fundamentalmente por la existencia de alteraciones estructurales severas.

Nº	Núcleo de población	Nombre de la iglesia	Coordenadas UTM - Altitud DATUM WGS 84, huso 19S	Catálogo Monumento Nacional (y fecha)		Provincia	Comuna	Propiedad	Región
1	Aico	San Antonio de Padua	19K - 451261 mE - 7920903 mS - 3530m	D. nº 451 (2012)	*	Arica	Camarones	Obispado de Arica, uso religioso	Arica y Parinacota
2	Airo	Santiago Apóstol	19K - 430293 mE - 8041714 mS - 4301m	D. nº 294 (2016)	*	Parinacota	General Lagos	Obispado de Arica, uso religioso	Arica y Parinacota
3	Belén	Santiago Apóstol	19K - 445612 mE - 7957963 mS - 3269m	D. nº 451 (2012)	*	Parinacota	Putre	Obispado de Arica, uso religioso	Arica y Parinacota
4	Belén	Virgen Candelaria	19K - 445689 mE - 7958010 mS - 3278m	D. nº 451 (2012)	*	Parinacota	Putre	Obispado de Arica, uso religioso	Arica y Parinacota
5	Caquena	Santa Rosa de Lima	19K - 478776 mE - 8003716 mS - 4402m	D. nº 294 (2016)	*	Parinacota	Putre	Obispado de Arica, uso religioso	Arica y Parinacota
6	Chitita	Virgen del Carmen	19K - 428204 mE - 7918128 mS - 2200m	D. nº 331 (2015)	*	Arica	Camarones	Obispado de Arica, uso religioso	Arica y Parinacota
7	Choque- limpie	Virgen de la Asunción	19K - 471925 mE - 7975260 mS - 4619m	D. nº 74 (2017)	*	Parinacota	Putre	Obispado de Arica, en ruinas	Arica y Parinacota
8	Cobija	San Isidro Labrador	19K - 438561 mE - 7927859 mS - 3107m	D. nº 451 (2012)	*	Arica	Camarones	Obispado de Arica, uso religioso	Arica y Parinacota
9	Codpa	San Martín de Tours	19K - 421632 mE - 7917417 mS - 1872m	D. nº 331 (2015)	*	Arica	Camarones	Obispado de Arica, uso religioso	Arica y Parinacota
10	Cosapi- lla	Virgen del Rosario	19K - 456237 mE - 8035456 mS - 4243m	D. nº 294 (2016)	*	Parinacota	General Lagos	Obispado de Arica, uso religioso	Arica y Parinacota
11	Esquiña	San Pedro	19K - 444196 mE - 7906187 mS - 2183m	D. nº 331 (2015)	*	Arica	Camarones	Obispado de Arica, uso religioso	Arica y Parinacota
12	Guacollo	Santa Rosa de Lima	19K - 463343 mE - 8036407 mS - 4107 m	D. nº 166 (2016)	*	Parinacota	General Lagos	Obispado de Arica, uso religioso	Arica y Parinacota
13	Gualla- tire	Inmaculada Concepción	19K - 483753 mE - 7954674 mS - 4242 m	D. nº 451 (2012)	*	Parinacota	Putre	Obispado de Arica, uso religioso	Arica y Parinacota
14	Guaña- cagua	San Pedro	19K - 425344 mE - 7919039 mS - 2023 m	D. nº 3365 (2018)	*	Arica	Camarones	Obispado de Arica, uso religioso	Arica y Parinacota
15	Livilcar	San Bartolomé	19K - 425534 mE - 7954487 mS - 1922m	D. nº 451 (2012)	*	Arica	Arica	Obispado de Arica, uso religioso	Arica y Parinacota
16	Mulluri	Virgen de la Natividad (nueva).	19K - 482338 mE - 7897675 mS - 4123m	D. nº 1778 (2005)	*	Arica	Camarones	Obispado de Arica, uso religioso	Arica y Parinacota
17	Pacha- ma	San Andrés Apóstol	19K - 444167 mE - 7962288 mS - 3429m	D. nº 451 (2012)	*	Parinacota	Putre	Obispado de Arica, uso religioso	Arica y Parinacota
18	Pachica	San José	19K - 435468 mE - 7907654 mS - 2239m	D. nº 331 (2015)	*	Arica	Camarones	Obispado de Arica, uso religioso	Arica y Parinacota
19	Parco- haylla	San José	19K - 477579 mE - 7912644 mS - 3988m	D. nº 3365 (2008)	*	Arica	Camarones	Obispado de Arica, uso religioso	Arica y Parinacota
20	Parina- cota	Virgen de la Natividad	19K - 471647 mE - 7987462 mS - 4428m	D. nº 1158 (1979)	*	Parinacota	Putre	Obispado de Arica, uso religioso	Arica y Parinacota
21	Putani	Virgen Inmaculada Concepción	19K - 442645 mE - 8040045 mS - 4342m	D. nº 166 (2016)	*	Parinacota	General Lagos	Obispado de Arica, uso religioso	Arica y Parinacota
22	Putre	Virgen de la Asunción	19K - 440849 mE - 7988058 mS - 3561m	D. nº 331 (2015)	*	Parinacota	Putre	Obispado de Arica, uso religioso	Arica y Parinacota
23	Saguara	Advocación desconocida	19K - 447834 mE - 7910592 mS - 3082m	D. nº 3365 (2008)		Arica	Camarones	Obispado de Arica, uso religioso	Arica y Parinacota
24	Socoro- ma	San Francisco de Asís	19K - 436327 mE - 7980592 mS - 3084m	D. nº 1902 (2005)	*	Parinacota	Putre	Obispado de Arica, uso religioso	Arica y Parinacota
25	Sucuna	San Antonio de Padua	19K - 453251 mE - 7916418 mS - 3340m	D. nº 294 (2016)	*	Arica	Camarones	Obispado de Arica, uso religioso	Arica y Parinacota
26	Tacora	Virgen del Carmen	19K - 423137 mE - 8034857 mS - 4094m	D. nº 294 (2016)	*	Parinacota	General Lagos	Obispado de Arica, uso religioso	Arica y Parinacota
27	Ticná- mar (viejo)	Virgen de la Asunción	19K - 448205 mE - 7944914 mS - 3234m	D. nº 451 (2012)	*	Parinacota	Putre	Obispado de Arica, uso religioso	Arica y Parinacota
28	Timal- chaca	Virgen de los Remedios	19K - 456065 mE - 7934426 mS - 3899m	D. nº 294 (2016)	*	Parinacota	Putre	Obispado de Arica, uso religioso	Arica y Parinacota

Nº	Núcleo de población	Nombre de la iglesia	Coordenadas UTM - Altitud DATUM WGS 84, huso 19S	Catálogo Monumento Nacional (y fecha)		Provincia	Comuna	Propiedad	Región
29	Tímar	San Juan Bautista	19K - 427157 mE - 7926692 mS - 2382m	D. n° 77 (2017)	*	Arica	Camarones	Obispado de Arica, uso religioso	Arica y Parinacota
30	Tulapalca	Advocación desconocida	19K - 443744 mE - 7923954 mS - 3329m	D. n° 3365 (2008)		Arica	Camarones	Obispado de Arica, uso religioso	Arica y Parinacota
31	Azapa	San Miguel	19K - 375576 mE - 7952192 mS - 269m	D. n° 331 (2015)	*	Arica	Arica	Obispado de Arica	Arica y Parinacota
32	Cara-guano	Advocación desconocida	19 K - 520656 mE - 7872183 mS - 3919m	D. n° 18 (2006)		Tamarugal	Colchane	Obispado de Iquique	Tarapacá
33	Chapicollo	Advocación desconocida	19 K - 519468 mE - 7872902 mS - 3935m	No consta		Tamarugal	Colchane	Obispado de Iquique	Tarapacá
34	Chapoco	San Martín de Tours	19K - 440018 mE - 8041432 mS - 4380m	D. n° 76 (2017)	*	Parinacota	General Lagos	Obispado de Arica	Arica y Parinacota
35	Isluga	Advocación desconocida	19 K - 529177 mE - 7871342 mS - 3812m	D. n° 680 (1975)		Tamarugal	Colchane	Obispado de Iquique	Tarapacá
36	Llocuoma	De Mauque	19 K - 512523 mE - 7863650 mS - 4015m	D. n° 18 (2006)		Tamarugal	Colchane	Obispado de Iquique	Tarapacá
37	Mocha	Advocación desconocida	19 K - 471069 mE - 7809175 mS - 2149m	1951		Tamarugal	Huara	Obispado de Iquique	Tarapacá
38	Nama	Advocación desconocida	19 K - 456512 mE - 7878151 mS - 3004m	D. n° 1778 (2005)		Tamarugal	Camiña	Obispado de Iquique	Tarapacá
39	Poconchile	San Jerónimo	19K - 387423 mE - 7959404 mS - 576m	D. n° 331 (2015)	*	Arica	Arica	Obispado de Arica	Arica y Parinacota

nes de los contrafuertes) y en su coronación (sin ellos). Se han obtenido diferentes ratios que evalúan la importancia de estos contrafuertes en la planta. La orientación de las iglesias (de la cabecera) se ha aportado como dato para valorar tanto la cuestión formal como la exposición a la dirección de los eventos sísmicos.

3.4. Características constructivo-estructurales.

La tabla 3 es el resultado del estudio constructivo-estructural realizado de todas y cada una de las iglesias, detallando los materiales de la fábrica y los revestimientos, según la leyenda que se expone. Se incluye también el análisis de las torres-campanario.

4. DISCUSIÓN

4.1. Valoración patrimonial y nueva clasificación estructural de las iglesias chilenas.

Las iglesias del Altiplano andino chileno están protegidas por Chile y fueron incluidas en 1998 en una "Lista Tentativa de Bienes Culturales" susceptibles de inserción en la Lista del Patrimonio Mundial de la UNESCO, "debido a sus valores culturales, históricos, arquitectónicos y artísticos" (7), por considerar que "son representativas de las formas de evangelización temprana ocurrida en la región andina, exponentes de una realidad transfronteriza que abarca Bolivia, Argentina y Chile (...) que testimonian el encuentro temprano entre las culturas originarias que ocuparon el territorio desde hace miles de años y los colonizadores españoles, con una época de auge posterior asociada a la mina de plata de Potosí..." (7).

Efectivamente, estas iglesias evidencian el sincretismo religioso y cultural denominado "barroco mestizo" y se encuen-

tran hoy en su mayor parte en lo que fueron poblados incas en los que dos evangelizadores³ españoles (8) fueron dando las primeras misas cristianas. Cinco siglos después se conservan los edificios con el mismo sistema estructural de fábrica y de madera, aunque hayan podido sufrir leves modificaciones tras cada terremoto, para mantener las iglesias en su uso.

Sin embargo, hasta el presente no se había realizado una identificación correcta de estas estructuras en el contexto del conjunto de las iglesias patrimoniales chilenas. A la vista del presente estudio, se aporta una nueva clasificación de las iglesias patrimoniales chilenas en tres grandes grupos desde el punto de vista estructural:

1. Iglesias de la colonización española.
2. Iglesias de Chiloé, 14 de las cuales obtuvieron la declaración de Patrimonio Mundial de la UNESCO en el año 2000.
3. Iglesias "recientes" posteriores a la Independencia.

Las primeras son de sistema estructural de fábrica y de entramado de madera, típico de la arquitectura española. En este grupo entran todas las iglesias del Altiplano que son objeto de estudio, tipología que es extensible a otras regiones del Altiplano andino.

Las segundas no pertenecen a la colonización española, sino a siguientes oleadas de colonización europea, de otras órdenes religiosas, que trajeron consigo sus propios sistemas constructivos, dando origen a estructuras fundamentalmente de madera (en su estructura portante), que por tanto tienen un comportamiento estructural muy distinto (grandes diferencias de masa, rigidez y ductilidad).

³ Que acompañaron a Diego de Almagro, conquistador de Chile.

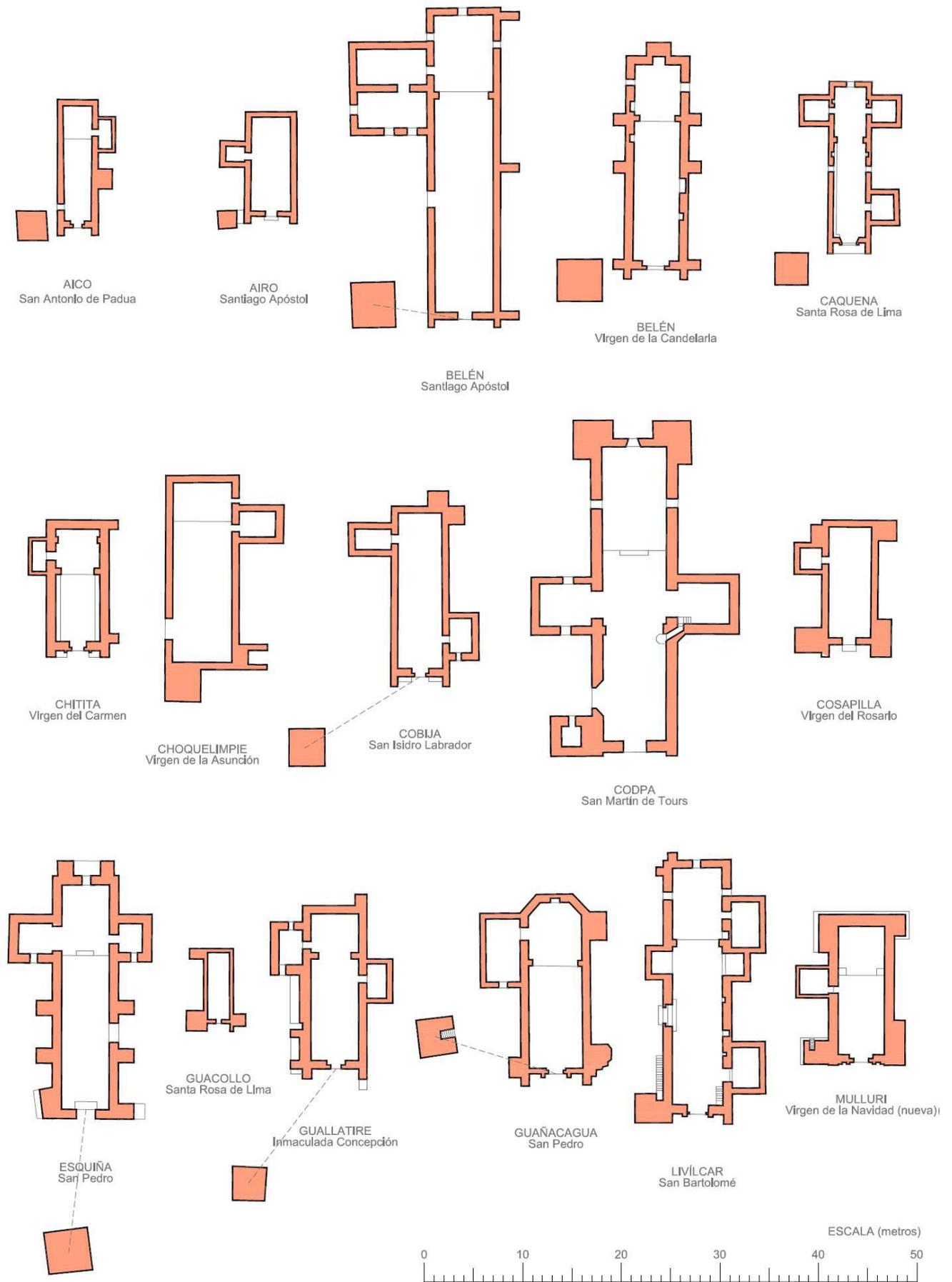


Figura 6. Plano de estudio comparado de las plantas de las iglesias del altiplano en las regiones de Arica y Parinacota (1 de 2).

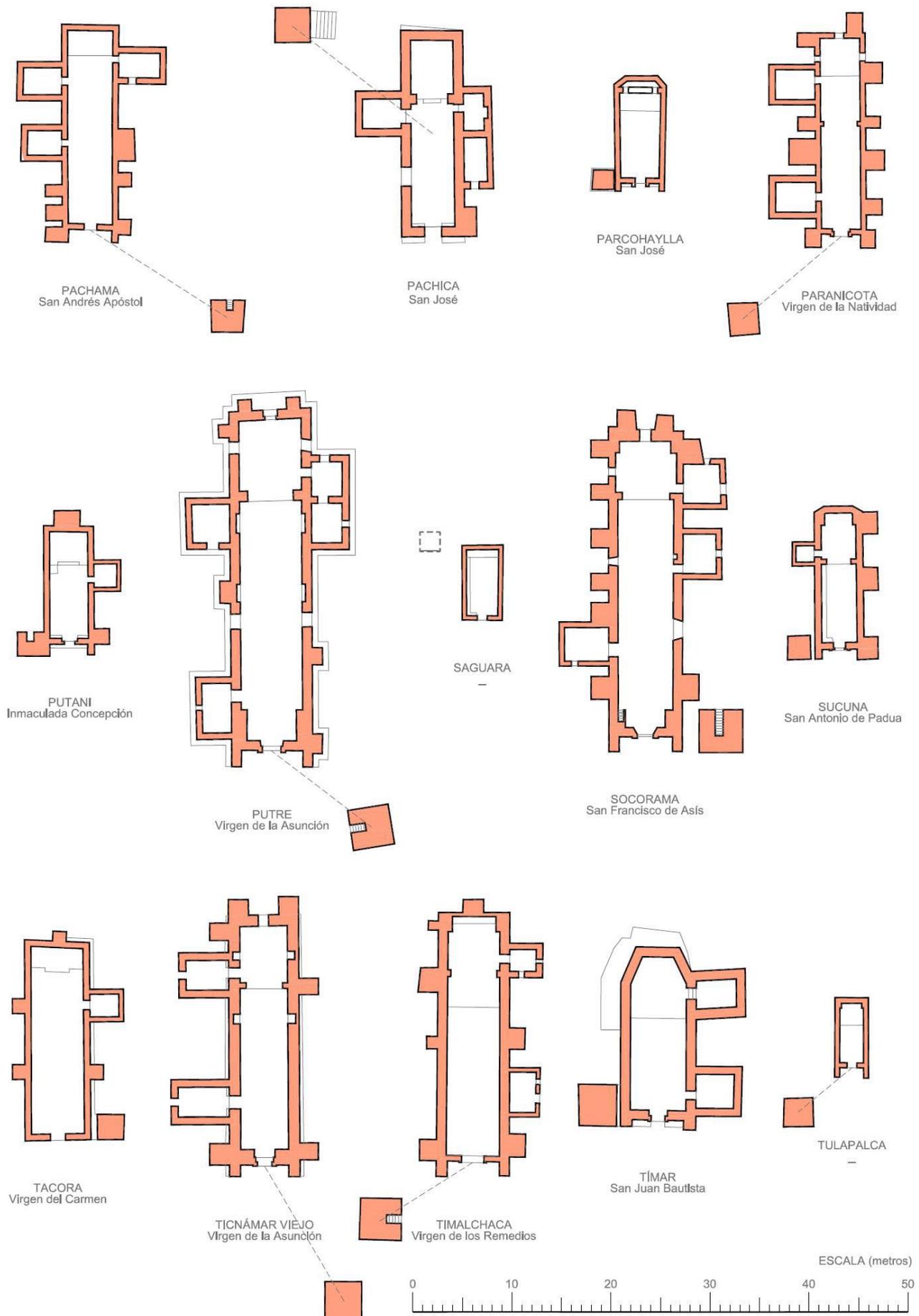


Figura 7. Plano de estudio comparado de las plantas de las iglesias del altiplano en las regiones de Arica y Parinacota (2 de 2).

Tabla 2. Estudio comparativo dimensional de las iglesias del Altiplano chileno.

IDENTIFICACIÓN		ESTUDIO DIMENSIONAL																					
Nº	Núcleo de población	Largo de la planta	Ancho de la planta	Proporción largo/ancho	Espesor muros	Luz a ejes	Altura muros laterales	Altura cumbrales	Altura de la cumbrales/ancho	Pte. Cubierta (%)	Esbeltez muros laterales	Proporción planta	Proporción luz/muro	Tamaño	Superficie útil	Superficie construida en coronación	Superficie cons-truida en base	Superficie fábrica en coronación	Superficie fábrica en base	% fábrica en coronación (SC/SU)	% fábrica en base	Orientación de la caba-cera	
1	Aico	13,11	4,17	3,14	0,70	3,47	2,63	4,17	63,1%	100,0%	73,80%	3,76	3,58	4,96	P	33,43	54,42	59,22	20,99	25,79	62,79%	77,15%	W-SW
2	Airo	10,74	5,29	2,03	0,65	4,64	3,42	4,85	64,7%	91,6%	53,80%	5,27	2,17	7,14	P	38,41	56,58	61,25	18,17	22,84	47,31%	59,46%	W-SW
3	Belén-Santiago	31,94	7,35	4,35	0,65	6,70	3,89	6,06	52,9%	82,5%	59,20%	5,98	4,67	10,31	G	179,50	237,32	248,74	57,82	69,24	32,21%	38,57%	S-SW
4	Belén-Candelaria	21,88	6,47	3,38	0,90	5,57	4,17	6,06	64,5%	93,7%	58,40%	4,64	3,77	6,19	M	93,50	141,24	154,71	47,74	61,21	51,06%	65,47%	S-SE
5	Caquena	16,48	4,38	3,76	0,55	3,83	3,73	5,14	85,1%	117,4%	64,60%	6,78	4,16	6,96	M	50,15	71,89	76,72	21,74	26,57	43,35%	52,98%	W
6	Chitita	13,38	6,39	2,09	0,95	5,44	2,82	5,52	44,2%	86,4%	84,40%	2,97	2,28	5,73	P	51,56	85,32	89,56	33,76	38,00	65,48%	73,70%	W-NW
7	Choque-limpie	19,84	7,44	2,67	0,75	6,69	4,17	6,41	56,0%	86,2%	60,40%	5,56	2,85	8,92	M	109,95	148,74	159,26	38,79	49,31	35,28%	44,85%	S-SW
8	Cobija	17,45	5,98	2,92	0,70	5,28	2,68	4,47	44,8%	74,8%	60,00%	3,83	3,17	7,54	M	71,31	102,67	114,22	31,36	42,91	43,98%	60,17%	W-SW
9	Codpa	32,10	8,63	3,72	1,15	7,48	5,50	9,22	63,7%	106,8%	86,20%	4,78	4,14	6,50	G	194,40	281,16	318,85	86,76	124,45	44,63%	64,02%	E-NE
10	Cosapilla	12,72	5,68	2,24	0,70	4,98	4,26	6,19	75,0%	108,9%	67,80%	6,09	2,41	7,11	P	48,86	72,73	90,99	23,87	42,13	48,85%	86,23%	S-SW
11	Esquiña	24,82	6,73	3,69	0,95	5,78	3,91	6,33	58,1%	94,1%	72,00%	4,12	4,13	6,08	M	110,82	167,23	201,98	56,41	91,16	50,90%	82,26%	E-SE
12	Guacollo	7,68	3,04	2,53	0,40	2,64	2,36	3,78	77,5%	124,4%	93,80%	5,89	2,76	6,60	P	15,30	23,22	30,50	7,92	15,20	51,76%	99,35%	SW
13	Guallatire	16,70	6,53	2,56	0,85	5,68	3,89	5,86	59,5%	89,7%	60,40%	4,57	2,79	6,68	M	71,42	109,05	129,64	37,63	58,22	52,69%	81,52%	SW
14	Guañacagua	18,34	7,15	2,57	0,85	6,30	3,44	6,43	48,1%	89,9%	83,60%	4,05	2,78	7,41	M	88,03	127,44	143,61	39,41	55,58	44,77%	63,14%	E-NE
15	Livilcar	25,88	7,05	3,67	0,95	6,10	4,52	7,66	64,1%	108,6%	89,00%	4,76	4,09	6,42	M	121,63	181,21	195,82	59,58	74,19	48,98%	61,00%	E
16	Mulluri	15,10	6,67	2,26	1,00	5,67	3,38	5,74	50,6%	86,0%	70,80%	3,38	2,49	5,67	M	62,47	101,04	119,17	38,57	56,70	61,74%	90,76%	SW
17	Pachama	20,84	5,66	3,68	0,60	5,06	3,05	5,29	53,8%	93,4%	79,20%	5,08	4,00	8,43	M	88,96	119,46	138,11	30,50	49,15	34,29%	55,25%	N-NE
18	Pachica	21,03	6,26	3,36	1,00	5,26	3,03	4,93	48,4%	78,8%	60,80%	3,03	3,81	5,26	M	80,82	132,73	144,85	51,91	64,03	64,23%	79,23%	E-NE
19	Parcoha-ylla	10,98	4,96	2,21	0,55	4,41	2,87	4,79	57,8%	96,6%	77,60%	5,21	2,37	8,02	P	39,44	55,41	58,76	15,97	19,32	40,49%	48,99%	W
20	Parinacota	20,45	5,11	4,00	0,55	4,56	2,92	4,82	57,1%	94,3%	74,40%	5,31	4,36	8,29	M	148,76	194,28	200,32	45,52	51,56	30,60%	34,66%	NE
21	Putani	12,01	5,10	2,35	0,60	4,50	3,48	5,24	68,3%	102,8%	69,00%	5,81	2,54	7,50	P	41,95	61,04	70,72	19,09	28,77	45,51%	68,58%	SW
22	Putre	34,44	8,18	4,21	1,00	7,18	5,20	7,91	63,6%	96,7%	66,20%	5,20	4,66	7,18	G	198,38	285,77	309,10	87,39	110,72	44,95%	55,81%	N
23	Saguara	7,67	5,00	1,53	0,45	4,55	0,00	0,00			0,00%	0,00	1,59	10,11	P	21,49	31,23	31,23	9,74	9,74	45,32%	45,32%	W
24	Socoroma	31,15	7,40	4,21	0,95	6,45	5,16	7,84	69,7%	105,9%	72,40%	5,43	4,68	6,79	G	163,64	233,20	277,98	69,56	114,34	42,51%	69,87%	N-NE
25	Sucuma	14,58	4,98	2,93	0,70	4,28	3,18	4,79	63,8%	96,1%	64,60%	4,54	3,24	6,11	M	44,92	71,26	83,48	26,34	38,56	58,64%	85,84%	W
26	Tacora	20,06	6,66	3,01	0,65	6,01	3,74	5,33	56,1%	80,0%	47,80%	5,75	3,23	9,25	M	100,63	133,89	145,54	33,26	44,91	33,05%	44,63%	W-NW
27	Ticnámbar (viejo)	25,38	7,13	3,56	1,15	5,98	4,79	7,19	67,2%	100,9%	67,40%	4,17	4,05	5,20	M	108,62	181,06	213,16	72,44	104,54	66,69%	96,24%	E
28	Timal-chaca	25,42	7,38	3,44	1,00	6,38	4,02	6,47	54,5%	87,7%	66,40%	4,02	3,83	6,38	M	124,63	184,82	212,75	60,19	88,12	48,29%	70,71%	NW
29	Timar	17,61	7,63	2,31	1,00	6,63	4,55	7,65	59,6%	100,2%	81,20%	4,55	2,51	6,63	M	84,36	128,60	166,26	44,24	81,90	52,44%	97,08%	NE
30	Tulapalca	7,13	4,39	1,62	0,50	3,89	0,00	0,00			0,00%	0,00	1,70	7,78	P	14,30	24,19	24,19	9,89	9,89	69,16%	69,16%	NE

Tabla 3. Estudio constructivo-estructural de las iglesias del altiplano chileno.

IDENTIFICACIÓN	CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES																			
	Nº	Núcleo de población	Elementos del conjunto	Forma de la nave	Posición de la torre-campanario	Contrafuertes				Arco total	Trazado de cubierta	Armadura de madera	Entramado secundario	Cobertura	Composición de la fachada	Fabricas de la iglesia	Revestimiento de la iglesia	Forma de la torre	Forma de la torre y remates	Fecha construcción / Fecha última restauración
						Nº de estribos laterales	Nº de estribos fach+cabecera	Nº de capiteles / escrituras laterales	Suma elementos arbotantes val.											
1	Aico	IN+T-C+A+C	IA-CR-PA-PE	ST-LV-EX	0+1	2+0	0+1	5	No	2A	PN-MR	CM+CU	E+P	L-CP-A-C-O-3V-S	MC-SC-AF-EM	SR	CU-M-A+T4+CC+SQ	MR/SR/SR		
2	Airo	IN+T-C+C	IA-CR	ST-LV-AJ	0+0	2+0	1+0	5	No	2A	PN-MR	CM+CH	CH	M-SC-A-C-O-1V-S	MC-SI-AF-EM	SR	C1-M-R+C2+T4+C-C+QP	MV/SV/SV		
3	Belén-Santiago	IN+TC	IA-CR-PA-PE	ST-LV-EX	0+3	2+0	2+0	9	AI	2A	PN-MR	CM+CH	CH	L-CC-A-C-O-1V-S	AC-SI-EM	RM	CU-M-R+T4+C+SQ	MP/SP/SP		
4	Belén-Candelaria	IN+TC	IA-CR-PA-PE	ST-LV-EX	3+3	2+1	1+2	15	AD	2A	PN+T-MR	CC	CH+P	L-CC-A-C-O-1V-S	AC-SI-	RA	CU-B-M-A+T4+C+SQ	MR/SR/SR	1625/2011	
5	Caquena	IN+T-C+A+C	IA-CR-PA-PE	ST-LV-EX	0+0	2+0	1+2	8	AD	2A	PN-MR	CM+CH	CH	M-CP-R-C-1V-S	MC-SI	RM	CU-M-A+T4+CC+SQ	MR/SR/SR	s. XVI -	
6	Chitita	IN+A	IA-CR-PA-PE	No tiene	0+2	2+0	1+0	6	AD	2A	PN-MR	CC	E+P	M-CP-E-C-O-2V-S	AC-SI-EM	RM	No tiene	MP/SP/SR	/2007	
7	Choque-limpie	IN+T-C+A+C	IA-CR-PA-PE	ST-PF-AF	0+2	0+0	0+1	5	No	2A	PN-ME	CM+CC	E+P	Muy alterada	MC-SI-EM	PC	CU-M-A+T4+CC+SQ	MP/SP/SR		
8	Cobija	IN+T-C+A	IA-CR	ST-LV-EX	0+1	2+1	1+1	8	No	2A	PN-MR	CM+CU	E+P	L-CC-A-C-O-1V-S	MC-SC-AF	RM	CU-M-A+T4+CC+SQ	MP/SP/SR	/2011	
9	Codpa	IN+T-C+A	IA-CR-PA-PE	ST-LV-AF	1+1	2+2	1+1	11	No	2A	PN-MR	CM+CH	CH	L-CC-A-O	MC-SI-EM	RM	C1-M-R+C2-H-R+T4+O+QP	MR/SR/O	1618	
10	Cosapilla	IN+T-C+A	IA-CR	ST-LV-AF	1+2	2+0	1+0	8	No	2A	PN-MR	CM+CU	E+P	M-SC-E-S	MC-SC-AF-EM	RM-SR	CU-M-R+T4+CC+SQ	MR/SR/SR		
11	Esquiña	IN+T-C+A+C	IA-CR-PA-PE	ST-PF-EX	3+3	0+2	1+1	12	No	2A	PN-MR	CC	E+P	L-SC-A-C-O-1V-S	AC-SS-SC-EM	RM	CU-M-A+T4+CC+SQ	MR/SR/SR	1618/2010/2015	
12	Guacollo	IN+T-C+A+C	IA-CR	ST-LV-AF	1+1	2+0	0+0	5	No	2A	PN-MR	CM+CU	E+P	M-SC-A-C-S	MC-SI-AF-EM	PC	C1-M-R+C2-M-A+T4+C-C+SQ	MP/SR/SR		
13	Guallatire	IN+T-C+A+C	IA-CR-PA-PE	ST-LV-EX	2+0	2+1	1+1	9	AI	2A	PN-MR	CC	E+P	M-SC-R-1V-S	MC-SC-EM	PC	C1-M-R+C2-M-A+T4+C-C+SQ	MP/SV/SR	/2013	
14	Guañacagua	IN+T-C+A+C	IA-CA-PA-PE	ST-LV-EX	1+2	2+0	1+0	7	AD	2A-CA3	PN-MR	CC	E+P	L-CC-A-C-O-1V-S	SS-SC-EM	MC	CU-M-A+T4+CC+SQ	MR/SP/SR	S. XVII/2011	
15	Livilcar	IN+T-C+A+C	IA-CR-PA-PE	ST-LV-AF	1+0	2+1	1+3	13	AD	2A	PN-MR	CU	CH	L-CC-A-C-O-1V-S	AC-SI-EA	PC	CU-M-R+EM+QP	AP/EP/O		
16	Mulluri	IN+T-C+A+RA	IA-CR-PA-PE	ST-LV-AF	1+2	2+0	1+0	8	No	2A	PN-MR	CM+CH	E+P	L-CC-A-C-O-1V-S	MC-SI-AF-EM	SR-PC	CU-M-A+T4+CC+SQ	MR/SR/MR		
17	Pachama	IN+T-C+A+C	IA-CR-PA-PE	ST-LP-EX	3+3	2+0	2+1	14	No	2A	PN-ME	CC	E+P	L-CC-A-C-O-1V-S	AC-SI-EA-EM	PC	CU-B-M-A+T4+C-C+SQ	MP/SR/SR	/2016	
18	Pachica	IN+T-C+A+C	IA-CR-PA-PE	ST-LV-EX	0+1	0+0	1+2	7	AD	2A	PN-MR	CM+CH	CH	M-SC-A-O	AC-SI-EA	PC	C1-M-R+C2-H-R+T4+C+SQ	MR/SP/O	1618	
19	Parcohaylla	IN+T-C+A+C	IA-CA-PA-PE	ST-LV-AJ	0+0	2+0	0+0	3	No	2A-CA3	PN-MR	CM+CU	E+P	M-SC-A-O-1V-S	AC-SI-EA	PC	CU-M-R+T4+C+SQ	MR/SR/SR		
20	Parinacota	IN+T-C+A+C	IA-CR-PA-PE	ST-LV-EX	4+5	2+1	2+0	16	AD	2A	PN-MR	CM+CC	E+P	M-CP-A-C-1V-S	MC-SI-EM	PC	CU-M-R+T4+C+SQ	MP/SR/SR		
21	Putani	IN+T-C+A+C	IA-CR-PA-PE	ST-LV-AF	0+1	2+1	0+1	7	No	2A	PN-MR	CM+CH	CH	M-CP-A-C-1V-S	MC-SI-AH-AF-EM	PC	CU-M-A+T4+C+SQ	MP/SR/SR		
22	Putre	IN+T-C+A	IA-CR-PA-PE	ST-LP-EX	2+2	2+2	2+2	16	AI	2A	PN-MR	CM+CH	CH	L-CC-R-C-O-1V-S	AC-SS-SC-EM-ES	RM-SV	CU-M-R+T4+O+QP	MR/SR/O	1670	
23	Saguara	IN+T-C+A+C	IA-CR	ST-LV-EX	0+0	0+0	0+0	0	No	2A	PN-MR	CM+CU	E+P	M-SC-A	MC-SC	SR	Desaparecida	Restos	s. XVIII	
24	Socoroma	IN+TC	IA-CR-PA-PE/coro	ST-LP-EX	6+2	2+2	1+2	18	AD. El actual es falso	2A	PN+T-MR	CM+CU	CH	L-CC-R-C-O-1V-S	AC-SS-SC-EM-ES	RM-SV	CU-B-M-R+T4+O+QP	MR/SR/O	1560/2012	
25	Sucuna	IN+T-C+A+C	IA-CR-PA-PE	ST-LV-AJ	0+3	2+0	1+0	8	AI	2A-CA1	PN-MR	CM+CU	E+P	M-CP-A-C-1V-S	MC-AH-EC-EM	SR-RM	CU-M-A+T4+O+SQ	MR/MR/MR		
26	Tacora	IN+T-C+A+C	IA-CR-PA-PE	ST-LP-AJ	2+1	0+1	0+1	7	Desconocido	2A	PN-MR	CM+CH	CH+P	M-SC-R-1V	MC-SI-EM	RM	CU-M-R+T4+C+QP	MR/SR/O	/2011	
27	Ticnámbar (viejo)	IN+T-C+A	IA-CR-PA-PE	ST-LP-EX	2+2	2+2	2+0	12	AI	2A	PN-MR	CM+CH	CH	M-SC-A-C-O-1V-S	AC-SI-EA	PC	CU-M-A+T4+CC+SQ	MR/SR/SR	/2015	
28	Timalchaca	IN+T-C+A	IA-CR-PA-PE	ST-LV-EX	4+2	2+1	0+2	13	AI	2A	PN-ME	-FT	-	M-CP-A-C-O-S	AC-SI-EM	RM	CU-M-R+T4+CC+SQ	MR/SR/SR	1877	
29	Timar	IN+T-C+A+C	IA-CA-PA-PE	ST-LV-AJ	0+0	2+0	0+2	7	No	2A	PN-MR	CC	CH	M-SC-A-1V-S	AC-SI-EM-EA	PC	CU-M-A+T4+C+SQ	MR/SR/SR	/2015	
30	Tulapalca	IN+T-C+A+C	IA-CR-PA-PE	ST-LV-EX	0+0	2+0	0+0	2	No	2A	PN-MR	CM+CH	CH	M-SC-D-C-1V-S	MC-AF-SI-EM	RM	CU-M-R+T4+CC-T+SQ	MR/SR/SR		

Leyenda de la tabla 3.	
Elementos del conjunto:	C Cornisa.
IN Iglesia de una única nave.	O Otros elementos decorativos.
TC Torre campanario.	iV Una ventana.
A Pared de atrio.	3V Tres ventanas.
C Calvario.	S Soportal realizado con vuelo de la cubierta sobre los contrafuertes de fachada.
Forma de la nave:	Material de cobertura:
IG Cabecera y nave de igual ancho.	E Esteras.
CR Cabecera recta.	P Paja.
CA Cabecera achaflanada.	CH Chapa ondulada/acanalada de cubierta.
PA Presbiterio separado con arco toral o restos de arco toral.	Fábricas de la iglesia.
PE Presbiterio elevado	SS Sillería de sillarejos en lienzos completos.
CP Coro a los pies	MC Mampostería careada en lienzos completos.
Posición de la torre-campanario:	MA Fábrica de adobe en lienzos completos (salvo arranques de mampostería).
ST Tiene torre campanario.	SI Esquinas del mismo material.
LV En el lado del evangelio.	SC Esquinas formadas de sillería o mampostería mejor careada.
LP En el lado de la epístola.	AF Adobes en hastial de fachada.
PF A los pies delante de fachada.	AH Adobes en hiladas reecridas.
EX Exenta.	ES Estribos de sillarejos.
AF Adosada a la iglesia.	EM Estribos de mampostería de piedra.
AJ Adosada como estribo sólo en su base.	EA Estribos de fábrica de adobe (salvo arranques de mampostería).
Contrafuertes:	Revestimientos de la iglesia.
Número de estribos laterales en la nave: Indica dos números, el primero corresponde al lado del evangelio y el segundo al lado de la epístola.	SR Sin revestimiento.
Número de estribos en fachada y cabecera: Indica dos números, el primero corresponde a la fachada y el segundo a la cabecera.	SV Sillería de sillarejos vista.
Número de capillas/sacristías laterales: Indica dos números, el primero corresponde al número de capillas o sacristías en el lado del evangelio y el segundo al del lado de la epístola.	RM Revestimiento de mortero.
Suma de elementos arriostrantes hacia el exterior: Indica la suma de todos los estribos y paredes arriostrantes.	RA Revestimiento de mortero armado (nuevo).
Nota: Cuando un estribo (en esquina) funciona estructuralmente para dos lados, se ha contado en dichos dos lados. En el caso de capillas o sacristías, cuenta sus dos paredes.	PC Pintura a la cal.
Arco toral separador nave-presbiterio:	Forma de la torre-campanario.
AD Arco toral dañado (sólo pilastras).	Se indica información para el cuerpo/s inferior/es, el cuerpo de campanas, el remate (cúpula) y la cubierta.
AI Arco toral íntegro (esté o no reconstruido).	CU Cuerpo único de la torre.
No No hay arco toral.	C1 Cuerpo 1 (inferior) de la torre.
Trazado de la cubierta:	C2 Cuerpo 2 (sobre el anterior) de la torre.
2A A dos aguas.	M Macizo (aunque pueda existir hueco para la puerta).
CA1 Cabecera vertiente a 1 agua.	H Con huecos.
CA3 Cabecera vertiente a 1 agua y 2 chaflanes.	B Con basamento diferenciado.
Trazado de la armadura de madera:	A Ataluzado
PN Armadura de pares y nudillo.	R Recto a plomo (sin talud)
PN-T Armadura de pares y nudillo con tirante.	T4 Cuerpo de campanas con 4 pilastras.
MR Madera en rollo o muy poco escuadrada.	EM Cuerpo de campanas con entramado.
ME Madera aserrada.	C Cúpula.
Entramado secundario:	CC Cúpula con contrapesos.
CM Cabrios de madera.	O Otras soluciones de remate.
CH Chapa de cubierta directamente.	SQ Sin cubierta diferenciada.
CU Cañas en una dirección.	QP Cubierta de paja.
CC Cañas cruzadas.	O Otras soluciones de cubierta.
Composición de la fachada:	Fábrica de la torre-campanario y sus revestimientos.
L Tiene piedra labrada vista.	Se indican los materiales y revestimientos tres zonas de la torre (separados por barras): del cuerpo/s inferior/es, del cuerpo de campanas, y de la cubierta:
M Tiene mampostería de piedra vista.	MV Mampostería de piedra vista.
CC Columnas arquitectura culta (barroco).	MR Mampostería de piedra revestida.
CP Columnas arquitectura popular.	MP Mampostería de piedra pintada a la cal.
SC Sin columnas.	AP Fábrica de adobe pintada.
A Puerta con arco de medio punto.	SV Sillería vista.
R Puerta con arco rebajado.	SR Sillería revestida.
E Puerta con arco elíptico.	SP Sillería pintada a la cal.
D Puerta con dintel.	EP Entramado de madera pintado.
	O Otras soluciones de cubierta.
	Fechas de construcción y de restauración reciente.
	Se señalan dos fechas: La primer corresponde a su primera construcción y la segunda corresponde a la de restauración más reciente.

Las terceras son iglesias construidas o muy intervenidas en siglos recientes, desde la independencia de Chile, coincidiendo con momentos en los que se incorporan sistemas estructurales nuevos, como el acero y el hormigón, y que por lo tanto quedan también fuera del ámbito de este estudio.

Este planteamiento distingue la presente investigación de otras llevadas a cabo por investigadores chilenos que no realizaron esta diferenciación de partida (9).

4.2. La cuestión formal: ¿Barroco andino?

Las iglesias objeto de estudio han sido incluidas por la Historia dentro del “barroco andino” o “arquitectura de estilo mestizo” atendiendo sólo a cuestiones formales. Este estilo se desarrolla durante el virreinato del Perú, entre los siglos XVI y XVIII, en Potosí, Arequipa y el lago Titicaca, región que se corresponde con los actuales países de Perú, Bolivia y Norte de Chile.

Según Pino (10) “el barroco americano, al estar sujeto a circunstancias diferentes a las de España, se separó de las formas que le dieron origen y mostró su propia realidad, la realidad americana” y cita entre los condicionantes a los terremotos por la “experiencia adquirida a través del constante construir y reconstruir a causa de los temblores (...). En lugar de edificar los templos con esbeltas torres y muros ligeros, se

debieron hacer con torres más bajas y pesadas y con el cuerpo principal de muros sumamente anchos, para que fueran capaces de soportar las sacudidas de los constantes terremotos”. “Barroco de los temblores” lo denominó Keleman (11). Sin embargo, no existe un estudio comparado riguroso del sistema estructural que acredite las verdaderas razones de sus diferencias. Hasta la fecha, las investigaciones se habían centrado sólo en la morfología arquitectónica y en la decoración. Únicamente abordando la cuestión desde la triada vitruviana función-construcción-forma puede darse explicación estructural a las formas advertidas por los historiadores.

En el apartado “decoración de fachada” de la tabla 3 se exponen los elementos de las fachadas de este presunto estilo “barroco”, como el trazado del arco de la puerta, la existencia en ocasiones de columnas labradas, etc:

- La imagen eficaz de la iglesia se obtenía a través de dos elementos: la fachada como muro de mayor altura de toda la iglesia y su decoración al exterior, y la torre como elemento singular.
- Los alardes estilísticos que presenta la fachada son la portada de piedra labrada enmarcada por los dos contrafuertes, el trazado del arco de la portada y la existencia de columnas y otros elementos decorativos como molduras o zócalo.
- Sólo 8 de las 30 iglesias (Cobija, Codpa, Guañacagua, Livilcar,

Mulluri, Pachama, Putre y Socorama) presentan en su composición y decoración un estilo culto que pueda ser calificado de “barroco”, siendo el resto de las iglesias tan parcas en su decoración que su estilo debe ser calificado de “popular”.

4.3. La cuestión técnica: ¿Sistema constructivo autóctono?

El estudio realizado confirma lo conocido en los estudios oficiales chilenos (7), que los materiales utilizados tanto en todas las iglesias (tabla 3) como en los propios poblados son piedra, madera, barro sobado (para la fabricación de adobes y de argamasa) y paja. Estos materiales son los reconocidos también en otras investigaciones en la zona andina (12). Pero se había dado por cierto que el origen de estas estructuras era autóctono sólo por el hecho de incluir barro y paja, sin considerar que es exactamente el mismo conjunto⁴ de materiales empleados en la construcción española de este tipo de pequeñas iglesias de fábrica-madera, que podemos encontrar en grandes áreas de la Península Ibérica (en este caso no en las Islas Canarias, donde no existe arcilla).

La caracterización estructural y el comportamiento sísmico de las estructuras de fábrica de las iglesias en Chile está siendo bien estudiado en los últimos años por equipos de investigadores chilenos (9, 13), pero falta un estudio comparado con los sistemas constructivos originales europeos, sin el cual no puede comprenderse su sentido estructural.

No hay constancia del empleo en la construcción de las iglesias de soluciones autóctonas locales, tales como quincha⁵ o bahareque (14), o de grandes bloques de piedras talladas al estilo incaico⁶ en los arranques de los muros (9). Se trata en todos los casos del sistema constructivo español de estructura de fábrica y armadura de madera, sobre el que se han introducido sólo las variaciones puntuales señaladas, que han resultado ser suficientes para mantener la estabilidad de los edificios, con carácter general, durante 5 siglos.

4.4. Estructura portante de fábrica.

La estructura portante es en todos los casos de fábrica de mampostería con las siguientes particularidades:

En 16 de las 30 iglesias (53,34%), se trata de fábrica de mampostería de piedra y en 13 de ellas (43,33%) es de fábrica de adobes de tierra sin cocer. Hay una, la iglesia de San Pedro de

Guañacagua (3,33%), en la que la fábrica de piedra no es de mampuestos irregulares sino de sillarejos labrados.

El estudio de la geología de la zona evidencia que se emplea siempre la piedra existente en el emplazamiento, normalmente andesita, que es una roca ígnea volcánica, y más comúnmente su variedad plutónica, la diorita. Sólo cuando no existe este material pétreo de buena calidad en el emplazamiento, se recurre a la fábrica de adobes de tierra. Al menos 10 de las 13 iglesias de mampostería presentan determinadas partes de sus muros con adobes, como por ejemplo en el hastial de la fachada (en 6 iglesias) o determinadas zonas recrecidas en las últimas hiladas (en otras 4 iglesias más), si bien este número podría ser mayor porque en muchas de las iglesias la fábrica se encuentra oculta por revestimientos.

El aparejo de la fábrica es español “de manual”:

- Los lienzos de muro tienen un espesor mínimo de 50-60 cm (que se aumenta cuando es estructuralmente necesario) y están aparejados a dos caras, con las piezas pegadas con argamasa muy débil (de tierra) y con piedras de mayor tamaño (perpiaños) que ligan una y otra cara.
- Las esquinas, los contrafuertes y las jambas de los huecos se resuelven canteando vivos en la mampostería (con débil labra) con piedras más grandes.
- Los adobes se realizan con tierra sobada (pisada, humectada y amasada) hasta alcanzar una cohesión y resistencia adecuada en la masa y aportando paja para armarla, encofrados con gradillas y secados al aire. Es la misma técnica que en la Península Ibérica.
- En las argamasas (de pegar tanto adobes como piedra) no hay constancia de la existencia de cal, tratándose de una masa de tierra sobada como la descrita para los adobes.

Se ha catalogado labra de cantería (trabajo con cincel, macesta y plantillas para formar caras rectas en la piedra) en casi todas las fachadas (en mayor o menor medida) y muy especialmente en 21 de las 27 torres con cuerpo de campanas de fábrica (77,78%), de las cuales 15 (el 55,56%) tienen buena labra para formar una cúpula de piezas aplantilladas con baiveles. Se observa que en casi todos los casos la piedra utilizada para labrar es la misma que la mampostería, pues se trata de piedras plutónicas que permiten la labra, es decir, que no se emplea otra piedra diferente para esta labor.

4.5. Armadura de madera y entramado de cubierta.

El entramado de cubierta es de armadura de pares y nudillo en todas las iglesias sin excepción. Su constatación es, junto a la existencia de cubiertas muy ligeras y la profusión de contrafuertes en la estructura de fábrica, la mayor aportación de este trabajo de investigación, pues los tres factores condicionan el comportamiento sísmico de estos edificios, que acreditan haber soportado sismos durante varios siglos (con leves reparaciones tras los terremotos) y los diferencian de las estructuras discutidas en el estado de la técnica.

En 28 de estas armaduras (93,33%) no existen tirantes (véase figura 8), lo cual es una anomalía dentro de la carpintería

4 Incluso la paja se ha empleado en las cubiertas, si bien el sistema de cobertura más común es el de tejas cerámicas.

5 El sistema constructivo denominado en Sudamérica “quincha”, es un entramado de cañas entrelazadas que se recubre con barro.

6 Los investigadores chilenos, a partir de catas en la iglesia de San Francisco en Santiago de Chile (de colonización española), concluyen que los mampuestos de mayor tamaño que existen en la cimentación podrían tener relación con los bloques tallados característicos de la construcción Inca, a los que atribuye una mejora sísmica. Sin embargo, en todas las iglesias españolas encontramos este mismo sistema que se denomina “ciclópeo”. Se descarta por tanto como rasgo diferenciador de las iglesias chilenas.

de armar española, que con esta configuración de pares se resuelve con un “asiento”, o estructura de tirantes (15). Esta tipología chilena no estaba por tanto bien identificada y valorada en el estado del arte.

Sólo dos casos (6,67%) presentan tirantes en zonas puntuales (son las iglesias de la Candelaria de Belén y de San Francisco de Asís de Socorama), pero se trata de iglesias que han sufrido intervenciones recientes, por lo que no es descartable que se hayan añadido los tirantes recientemente de forma inadecuada sin reflexión estructural.

Las piezas de madera son mayoritariamente de rollizo (figura 8) o de muy leve escuadrado en 27 de las 30 iglesias (el 90,00%) y sólo 3 iglesias (el 10,00%) presentan armaduras con algunas piezas aserradas o escuadradas. La mayoría de las maderas originales se han perdido, pues se habrían ido sustituyendo paulatinamente por nuevas piezas para mantener en uso los edificios y sus sistemas estructurales a lo largo de los siglos. Sí ha sido conservado el sistema estructural original, cosa que se sabe porque desde las más antiguas a las últimas restauraciones el esquema estructural es invariablemente el mismo.

El entramado secundario de los faldones sobre los pares está realizado a base de palos de madera (cabrios), o a base de cañas⁷, sobre el que se coloca una estera de totora⁸ y encima la cobertura de paja (figura 9). Las cañas a veces se colocan simples y a veces dobles, a veces a modo de correas perpendiculares a los pares y a veces esviadas y cruzadas en dos direcciones perpendiculares. La disposición esviada es estructuralmente mejor, pues las cañas funcionan como una retícula tridimensional a flexión y se aprecia más en las últimas intervenciones de restauración de la Fundación Altiplano (6).



Figura 8: Iglesias chilenas del Altiplano: Izquierda, vista general de una armadura de pares y nudillo sin tirantes. Derecha, detalle de nudillos que, como se aprecia, no están ensamblados sino simplemente atados, generando un tipo de unión resistente sísmicamente. Fotografías de restauraciones recientes de la Fundación Altiplano.

⁷ Las cañas se emplean con el mismo objeto y disposición constructiva que los cabrios de madera en los entramados españoles. Simplemente se encontró en América un material (las cañas) que para secciones pequeñas (de tercer orden) ofrecía más resistencia, rigidez y durabilidad que las maderas convencionales.

⁸ Totora (del quechua *t'utura*): es un tipo de junco (*Schoenoplectus californicus*) muy común en esteros y pantanos en América del Sur.



Figura 9: Carga muerta a la armadura: izquierda, estructura secundaria de faldones. Derecha, cobertura de paja sobre estera de totora. Imágenes de obras de restauración de la Fundación Altiplano.

4.6. Constatación de aportaciones estructurales clave para su estudio posterior.

El estudio estadístico realizado evidencia con respecto al sistema estructural:

- En la fábrica, la generalización de contrafuertes dispuestos de manera aparentemente desordenada, que no están justificados por arcos o bóvedas (que no existen) y lo que es más importante, dispuestos sólo en el exterior.
- En la estructura de madera de cubierta, una tipología inédita de armadura de pares sin tirante.
- Y la efectividad de estos cambios introducidos sobre la estructura original, pues es evidente que se ha conseguido la pervivencia de estos edificios hasta el presente soportando terremotos.

Deberán ser estudios posteriores lo que acrediten el porqué de su efectividad estructural:

- Por análisis estructural comparado entre los contrafuertes ataluzados presentes en estas iglesias y los contrafuertes rectos del estado del arte.
- Mediante modelos de armaduras tradicionales atirantadas (16) (véase figura 10) y armaduras del Altiplano sin tirante (véanse figuras 8 y 9). Se podrá entonces explicar que esta novedosa armadura ejercía una función de “muelle” atando las cabezas de los muros desde el interior de la nave de estas iglesias y absorbiendo así la energía del terremoto.

Es importante, además: Extender el método a otras zonas sísmicas y a otras tipologías de estructuras históricas. Y encontrar referencias escritas a lo descubierto, buscando en los antiguos tratados de la construcción española. Siguiendo estas líneas de pesquisa de los tratados históricos, investigadores italianos (17) han sacado a la luz reglas de construcción antisísmica aplicadas en Italia durante el dominio del Imperio español.

5. CONCLUSIONES

Se sigue una línea de investigación que analiza las tipologías estructurales históricas que hayan superado terremotos en zonas de alta peligrosidad sísmica, de forma comparada con sus modelos homólogos en zonas no-sísmicas, para llegar a determinar qué estrategias sísmicas fueron introducidas.

En este caso se ha estudiado el Altiplano andino chileno, en concreto las pequeñas iglesias construidas por los españo-



Figura 10. Modelo estructural a escala de una armadura de pares atirantados, construida siguiendo el tratado de López de Arenas (16) soportando peso y transmitiendo a los muros sólo cargas verticales.

Obsérvese cómo el modelo, simplemente ensamblado, alcanza el equilibrio y es capaz de resistir varias veces su peso. Basa su equilibrio y resistencia en los tirantes. Elaboración propia.

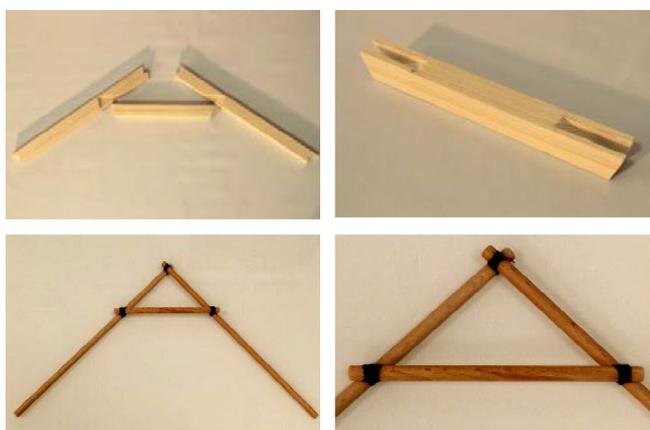


Figura 11: Comparación de los dos modelos de pares con nudillos: caso peninsular (con ensambles en quijera) y caso del Altiplano (con uniones atadas). Fuente: elaboración propia.

les en esta región de evangelización temprana (s. XV-XVI). Porque son muchas, han sido menos alteradas y mantenidas en uso, tienen un reparto uniforme en el territorio y son el resultado de un sistema estructural repetido experimentado con éxito.

Contra la creencia en el estado de la técnica de que las estructuras sismoresistentes deben ser muy ligeras completamente de madera (Japón) o de nudos rígidos de hormigón y de acero (recientes), las iglesias españolas objeto de estudio demuestran que las estructuras históricas con estructura portante de fábrica y cubierta de madera, sin refuerzos con materiales nuevos, han podido sobrevivir a repetidos eventos sísmicos con daños moderados, introduciendo para ello las siguientes estrategias sísmicas:

- Se realizaron iglesias de una sola nave, para evitar la vulnerabilidad de pilastras y columnas interiores.
- Se redujo el ancho de la nave para que la luz de la estructura de cubierta fuera más pequeña. La proporción de la planta es más alargada que en los modelos peninsulares.
- Se redujo la esbeltez de los muros, dotándolos de menor altura, buscando un centro de gravedad más bajo.
- Se colocaron numerosos contrafuertes apilastrando los muros, que no están justificados por arcos o bóvedas,

para hacer resistentes los muros a los esfuerzos horizontales del sismo “fuera del plano”, hacia fuera de la planta.

- La geometría de los contrafuertes es ataluzada en la mayor parte los casos, para conseguir mayor base y un centro de gravedad más bajo que mejora su estabilidad.
- La cabecera o presbiterio no sobresale en planta ni en sección y sólo se separa formalmente de la nave con un arco total que en la mayor parte de los casos estudiados está roto a sismo, habiéndose conservado sólo sus pilastras con la función de separar formalmente ambos espacios litúrgicos.
- La fachada, elemento significativo de la iglesia, es el único muro que supera en altura a la cornisa y, para dotarle de resistencia a sismo “fuera del plano”, aparece siempre con dos contrafuertes que se justifican por resistencia sísmica y que formalmente enmarcan la portada. Para la decoración de estas fachadas se emplean algunos elementos decorativos que recuerdan al barroco imperante en este tiempo, pero sin llegar más allá de la mera decoración.
- Se suprimieron los pisos interiores (no hay coro a los pies).
- Se suprimieron los arcos y bóvedas para las estructuras de cubierta, que tienen las iglesias españolas contemporáneas.
- En cuanto a las fábricas, los materiales son los mismos empleados en España: mampostería de piedra local y fábrica de adobe, con argamasas de barro para pegar los mampuestos, revocos de barro y enjalbegado de cal.
 - Se sigue la constante de aprovechamiento de los materiales locales en perfecta adaptación al territorio.
 - No se han encontrado elementos de confinamiento.
 - No se han detectado adaptaciones de sistemas prehispánicos como el de bahareque o los bloques de piedra maclados de la cultura Inca.
- El entramado de madera de la cubierta y la cobertura se aligeran al máximo. Se emplean cabrios de madera en rollizo o bien cañas con su misma función estructural, y sobre ellos una estera que recibe la cobertura de paja. No se emplea teja para reducir peso. Si en alguna ocasión se emplearon otras soluciones más pesadas (de estructura o de cobertura), el edificio no ha sobrevivido al sismo.
- La omnipresente espadaña del barroco americano se suprime en el Altiplano chileno por su vulnerabilidad sísmica y para el campanario se contruye una torre.
- La estructura de estas torres-campanario es también singular con respecto a otras torres de iglesias españolas, particularizándose las estrategias descritas:
 - Esbeltez pequeña y macizado del basamento-primer cuerpo, incluso a veces la escalera de acceso al cuerpo de campanas es exterior por un contrafuerte.
 - El campanario participa de la imagen eficaz de la iglesia y se permiten ciertas licencias (se remata con un templete de cuatro pilastras y una cubierta con bóveda), constando que se derrumba y se reconstruye con cada terremoto, como “pieza de sacrificio”.
 - En la mayoría de los casos, la torre se sitúa separada de la nave para evitar que los restos del campanario caigan sobre la iglesia y para evitar el “aplauzo sísmico” de dos estructuras adyacentes.

- La estructura de madera de la cubierta es del tipo conocido en la carpintería tradicional española como de armadura de pares con hilera y nudillo, pero que contra la tipología general carece de atirantado (o asiento). Las uniones entre los pares y el nudillo, y entre los pares y la hilera, se realizan con atado de tiras de cuero (figura 11) para evitar el desplazamiento de los ensambles, convirtiendo al conjunto pares-nudillo en un pórtico de nudos rígidos inédito en la bibliografía de estructuras de madera. Serán estudios posteriores los que deberán demostrar que:
 - Se suprimieron los tirantes por su efecto perjudicial en caso de acción horizontal de sismo.
 - La armadura sin tirantes y los muros con contrafuertes sólo en el exterior conforman un sistema “simbiótico” o complementario: La rigidez de los muros permite que la armadura pueda no tener tirantes y, a cambio, la armadura realiza una función de “muelle” o diapason entre las cabezas de los muros, dándoles la resistencia “fuera del plano” al interior de la planta, a la vez que absorbe las deformaciones impuestas por el sismo sin pérdida de equilibrio.

REFERENCIAS

- (1) Lourenço, P.B.; Ioannou, I.; Illampas, R. (2020). Seismic appraisal of heritage ruins: The case study of the St. Mary of Carmel church in Cyprus. *Engineering Structures*, 224, 111209. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111209>.
- (2) Salcedo, J.C.; Campesino, A.J. (2012). Experiencias constructivas del terremoto de Lorca. *Investigaciones Geográficas* (Universidad de Alicante) (57), 7 - 37. <https://doi.org/10.14198/INGEO2012.57.01>.
- (3) Fortea, M.; Salcedo, J.C. (2020). La influencia de las alteraciones estructurales en los daños del terremoto de Amatrice, Italia (2016). *Informes de la Construcción*, 72 (559), e349. <https://doi.org/10.3989/ic.71378>.
- (4) Madariaga R. (1998). Sismicidad de Chile. *Física de la Tierra*, vol. 10, pp. 221-258
- (5) Chile, G.d. (1970). Ley nº 17.288 de Monumentos Nacionales.
- (6) Guarda Gewitz, G.; Moreno Jeria, R.; Pereira Campos, M. (2012). Iglesias andinas de Arica y Parinacota: Las huellas de la Ruta de la Plata. (ISBN 978-956-9221-00-2 ed.). (F. Altiplano, Ed.) Arica, Chile.
- (7) Consejo de Monumentos Nacionales de Chile. (2013). Decreto nº 0451. Decreto de declaración de Monumentos Nacionales de las iglesias de Livilcar, Pachama, dos de Belén, Ticnámbar, Aico, Cobija y Guallatire. Ministerio de Educación. <https://www.monumentos.gob.cl/monumentos/monumentos-historicos>.
- (8) Gazulla Galve, F. (1918). Los primeros Mercedarios en Chile. 1535-1600. Santiago de Chile. *La Ilustración*.
- (9) Jorquera, N.; Misseri, G.; Palazzi, N.; Rovero, L.; Tonietti, U. (2017). Structural characterization and seismic performance of San Francisco Church, the most ancient monument in Santiago, Chile. *International Journal of Architectural Heritage*, 11 (8), 1061-1085. <https://doi.org/10.1080/15583058.2017.1315620>.
- (10) Pino, G. (1987). El barroco americano. *Revista Estudios* (7), 119-139. ISSN-e 1659-3316, ISSN 1659-1925
- (11) Neumeyer, A.; Kelemen, P. (1952). Baroque and Rococo in Latin America. *Journal of Aesthetics and Art Criticism*, 10 (3), 280. <https://doi.org/10.2307/426554>.
- (12) Greco, F.; Lourenço, P. (2021). Seismic assessment of large historic vernacular adobe buildings in the Andean Regio of Peru. Learning from Casa Arones in Cusco. *Journal of Building Engineering*, 40, 102341. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102341>.
- (13) Palazzi, N.; Favier, P.; Rovero, L.; Sandoval, C.; de la Llera, J.C. (2020). Seismic damage and fragility assessment of ancient masonry churches located in central Chile. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18, 3433-3457. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00831-1>.
- (14) Carbajal, F.; Ruiz, G.; Schexnayder, C.J. (2005). Quincha construction in Perú. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 10 (1). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0680\(2005\)10:1\(56\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0680(2005)10:1(56)).
- (15) Nuere Matauco, E. (2003). La Carpintería de Armar Española (3ª edición ed.). (I. E. Henares, Ed.) Madrid: Munilla-Lería.
- (16) López de Arenas, Diego (1633). *Breve compendio de la carpintería de lo blanco y Tratado de alarifes*. CD-Rom (edición facsímil). Editado por Transcripción de Luis Estupiñán. Sevilla: Biblioteca Nacional, 1/65901 - R/31812, 1633.
- (17) Ruggieri, N., Tampone, G. y Zinno, R. (2013). Typical failures, seismic behavior and safety of the Bourbon system with timber framing. *Advanced Materials Research*, 778, 58-65. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.778.58>.