

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE ARQUITECTURA

VALPARAÍSO – CHILE



**MÉTODO DE APLICACIÓN DE UN BIOCIDA NATURAL PARA
LA PROTECCIÓN PREVENTIVA DE LA MADERA EN EL
PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO DE LAS IGLESIAS DE
CHILOÉ**

GENESIS CAROLINA DEL CARMEN PARDO ESPINOZA

MEMORIA DE TITULACIÓN

MODALIDAD I+D

PROFESOR GUÍA: Luis Felipe González Böhme

PROFESORA CO-REFERENTE: Dra. Marcela Carvajal Tocornal

JULIO 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Método de aplicación de un biocida natural para la protección preventiva de la madera en el patrimonio arquitectónico de las iglesias de Chiloé.

Nombre del candidato(a): Genesis Carolina del Carmen Pardo Espinoza.

Carrera / Grado: Arquitectura / Licenciada en Arquitectura

Campus: Casa Central Valparaíso **Departamento:** Arquitectura.

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Luis Felipe González Böhme, en mi calidad de profesor guía del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un período de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor guía de memoria:

Fecha: 01-10-2026 **Firma:** 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 25-09-2026 **Firma:** 

AGRADECIMIENTOS

A mi profesor guía, Luis Felipe González Böhme, por la orientación sostenida durante todo el proceso, y a la profesora co-referente, Dra. Marcela Carvajal Tocornal, por abrir el puente hacia la biotecnología sin el cual este trabajo no habría sido posible. A Camila Murúa, por la ejecución del ensayo experimental y por su disposición constante a explicar lo que yo no podía leer sola.

A la comunidad de Ichuac y a la Fundación Iglesias Patrimoniales de Chiloé, que facilitaron el acceso al inmueble y compartieron su documentación, y a José Luis Catalán, presidente de la Asociación de Carpinteros Patrimoniales de Chiloé, por el tiempo dedicado a explicar los criterios del oficio, pues buena parte de lo que esta memoria propone estaba ya contenido en ese saber.

DEDICATORIA

A mi familia, en especial a los que me soportaron en mis momentos de mayor estrés.

A mi padre y a mi madre, que nunca se rindieron enseñándome que la vida sube y baja en todo aspecto y decisión.

A mi Blanca, el ser más hermoso que tuve, que me enseñó a vivir en compañía.

RESUMEN

Las Iglesias Patrimoniales de Chiloé, inscritas en la Lista del Patrimonio Mundial de la UNESCO, deben su valor a su materialidad en madera nativa. La restricción legal de corta que pesa sobre las especies más durables (Decreto Supremo N°490 de 1976 para el alerce; Ley N°20.283 para el ciprés de las Guaitecas) obliga a reponer con especies de menor durabilidad natural, cuyo tratamiento el marco constructivo puede exigir según la clase de riesgo. Entre los preservantes admitidos figura el arseniato de cobre cromatado, un compuesto hidrosoluble que incorpora metales pesados tóxicos y persistentes, como el arsénico y el cromo, a la materialidad del bien. Así, la propia norma constructiva introduce en un Monumento Nacional de uso comunitario un producto restringido hace dos décadas en los mercados internacionales de referencia, sin que el marco patrimonial disponga de un criterio que evalúe la inocuidad de lo que se incorpora.

Esta investigación desarrolla un método de aplicación de un biocida natural a base de aceite esencial de boldo (*Peumus boldus*) para la protección preventiva de los elementos de madera de estas iglesias, con la Iglesia Natividad de María de Ichuac como caso de estudio. El ensayo, ejecutado en condiciones controladas de laboratorio sobre probetas de coigüe y con cepas aisladas del propio monumento, no registró crecimiento visible en las probetas tratadas con boldo al 8 % durante 14 días de observación, siendo el único de los tres tratamientos ensayados con desempeño consistente entre cepas. El resultado sugiere una capacidad preventiva temprana y no una eficacia demostrada. Sobre esa base se formuló un protocolo estructurado en una carta de superficies aptas, un régimen de reaplicación zonificado por orientación y una modalidad de ejecución comunitaria. Su evaluación de conformidad muestra que el arseniato de cobre cromatado cumple el marco constructivo, pero incumple los principios patrimoniales, mientras que el boldo respeta dichos principios, con dos verificaciones pendientes, pero carece del registro que exige el marco constructivo. La investigación alcanza el nivel de una prueba de concepto en laboratorio, con validación en terreno pendiente.

Palabras clave: patrimonio en madera, biodeterioro fúngico, aceite esencial de boldo, Iglesias de Chiloé, protección preventiva.

ABSTRACT

The Heritage Churches of Chiloé, inscribed on the UNESCO World Heritage List, owe their value to their materiality in native timber. The legal harvesting restrictions on the most durable species (Supreme Decree No. 490 of 1976 for larch; Law No. 20,283 for Guaitecas cypress) force replacement with species of lower natural durability, whose treatment the building code may require according to the use hazard class. Among the admitted preservatives is chromated copper arsenate, a waterborne compound that incorporates persistent toxic heavy metals, such as arsenic and chromium, into the materiality of the asset. Thus, the building code itself introduces into a communally used National Monument a product restricted two decades ago in the reference international markets, without the heritage framework providing any criterion to assess the innocuousness of what is incorporated.

This research develops a method for applying a natural biocide based on boldo essential oil (*Peumus boldus*) for the preventive protection of the timber elements of these churches, with the Church of Natividad de María de Ichuac as a case study. The assay, conducted under controlled laboratory conditions on coigüe test specimens and with strains isolated from the monument itself, recorded no visible growth on the specimens treated with boldo at 8 % over 14 days of observation, being the only one of the three tested treatments with consistent performance across strains. The result suggests an early preventive capacity rather than a demonstrated efficacy. On this basis, a protocol was formulated, structured into a chart of suitable surfaces, a reapplication regime zoned by orientation, and a community execution model. Its conformity assessment shows that chromated copper arsenate meets the building code but fails the heritage principles, whereas boldo respects these principles, with two verifications pending, but lacks the registration required by the building code. The research reaches the level of a laboratory proof of concept, with field validation still pending

Keywords: timber heritage, fungal biodeterioration, boldo essential oil, Churches of Chiloé, preventive protection.

ÍNDICE DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

CA-B. Cobre azol tipo B.

CCA. Arseniato de cobre cromatado.

CMI. Concentración mínima inhibitoria.

CMN. Consejo de Monumentos Nacionales.

CONAF. Corporación Nacional Forestal.

FIP. Fundación Iglesias Patrimoniales de Chiloé.

ICOMOS. Consejo Internacional de Monumentos y Sitios.

INFOR. Instituto Forestal.

INN. Instituto Nacional de Normalización.

IPV. Impregnado en planta al vacío.

MCAz. Cobre micronizado azol.

MINVU. Ministerio de Vivienda y Urbanismo.

μCAC. Cobre micronizado azol tipo C.

NCh. Norma Chilena.

OGUC. Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones.

PDA. Agar papa dextrosa.

SAG. Servicio Agrícola y Ganadero.

SBX. Sílibo, óxido de boro.

UNESCO. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.

VUE. Valor Universal Excepcional.

GLOSARIO

Aceite esencial. Extracto natural volátil obtenido de una planta, compuesto por sustancias aromáticas con actividad biológica.

Actividad celulolítica. Capacidad de un hongo para degradar la celulosa de la madera, usada como criterio para seleccionar las cepas más agresivas.

Autenticidad material. Principio de conservación que valora la permanencia de la materia original de un bien patrimonial como parte esencial de su valor.

Biocida. Sustancia capaz de eliminar o inhibir el crecimiento de organismos que deterioran un material, en este caso los hongos de la madera.

Biodeterioro. Deterioro de un material causado por organismos vivos, como hongos, insectos o bacterias.

Carpintería de armar. Sistema constructivo tradicional en madera que resuelve la estructura mediante piezas de gran sección unidas por ensambles, sin depender de elementos metálicos.

Cepa. Población de un hongo derivada de un mismo aislamiento, cultivada e identificada para su estudio.

Ensamble. Unión entre dos piezas de madera que se encuentran en ángulo, trabadas mediante cortes complementarios, como la caja y espiga.

Empalme. Unión entre dos piezas de madera por sus extremos, que las prolonga en su longitud, como el rayo de Júpiter.

Envigado. Conjunto de vigas que conforman la estructura horizontal de un piso o entrepiso.

Halo. Zona de inhibición alrededor de una colonia, cuya presencia indica que una sustancia frena el crecimiento del hongo.

Hongo xilófago. Organismo que se alimenta de la madera y degrada sus componentes, provocando su pudrición.

Lixiviación. Pérdida de un producto aplicado a la madera por efecto del agua, que lo arrastra y reduce su permanencia.

Micelio. Conjunto de filamentos que forman el cuerpo de un hongo y que se observa como crecimiento visible sobre la madera.

Mínima intervención. Principio de conservación que busca actuar sobre el bien patrimonial lo menos posible, conservando la mayor cantidad de material original.

Penetración. Profundidad que alcanza un preservante en el interior de la madera, medida en milímetros.

Probeta. Pieza de madera normalizada y preparada para un ensayo de laboratorio, a diferencia de la muestra extraída en terreno.

Pudrición blanca. Tipo de pudrición en que el hongo degrada tanto la celulosa como la lignina, dejando la madera fibrosa y clara.

Pudrición blanda. Tipo de pudrición superficial que se produce en condiciones de humedad muy alta y reblandece la superficie de la madera.

Pudrición parda. Tipo de pudrición en que el hongo consume la celulosa y deja la lignina, fracturando la madera en bloques.

Solera. Pieza horizontal de madera que sirve de base o de amarre a la estructura, apoyada sobre la fundación o entre niveles.

Tejuela. Pieza pequeña y delgada de madera, generalmente de alerce, usada como revestimiento de cubiertas y fachadas.

ÍNDICE

Resumen	04
Abstract	05
Índice de siglas y acrónimos	06
Glosario	08
- DEFINICIÓN DEL PROYECTO	13
Antecedentes nacionales	14
Antecedentes internacionales	20
Problema.....	22
Solución Propuesta	24
Impacto de la investigación	26
- ESTADO DEL ARTE	28
1. Biodeterioro fúngico en las iglesias de Chiloé	29
2. Productos existentes en el mercado.....	31
3. Soluciones alternativas actuales	36
4. Permanencia del tratamiento	41
5. Precedentes en conservación de arquitectura patrimonial en madera.....	42

6. Análisis de la propiedad intelectual e industrial.....	43
Síntesis de la brecha	44
- MARCO DE REFERENCIA	46
Marco normativo nacional	47
Marco normativo internacional	51
- MARCO CIENTÍFICO	53
Hipótesis de investigación	54
Objetivos	55
- METODOLOGÍA	56
Etapas 1. Levantamiento	58
Etapas 2. Muestreo fúngico.....	79
Etapas 3. Experimentación.....	86
Etapas 4. Protocolo	91
- RESULTADOS Y EVALUACIÓN DEL PROTOTIPO	95
1. Resultados del ensayo experimental.....	96

2. Evaluación de conformidad.....	99
3. Nivel de madurez del prototipo	101
- CONCLUSIÓN	102
- TRABAJO FUTURO	103
- BIBLIOGRAFÍA	104
- ANEXOS	110

DEFINICIÓN DEL PROYECTO

Antecedentes nacionales

En el archipiélago de Chiloé existen 152 iglesias de madera pertenecientes a la denominada Escuela Chilota de Arquitectura Religiosa en Madera, tradición constructiva surgida del encuentro entre las técnicas de carpintería introducidas por las misiones jesuitas circulares y el conocimiento local del trabajo de la madera (Subsecretaría del Patrimonio Cultural, 2019). De ese conjunto, dieciséis fueron inscritas por la UNESCO en la Lista del Patrimonio Mundial el año 2000, en reconocimiento a los criterios (ii) y (iii): el intercambio de valores humanos expresado en una tradición constructiva mestiza y el testimonio excepcional de una cultura viva.

Lo que distingue a este conjunto de otros bienes patrimoniales del país es que su valor reside en la propia materialidad. La Declaración de Valor Universal Excepcional del Sitio (UNESCO, 2000) reconoce que el atributo esencial de estos templos radica precisamente en su materialidad: la madera en su diversidad de especies, los



Figura 1. Ubicación de las dieciséis Iglesias de Chiloé Figura 2. Mapa de Chile

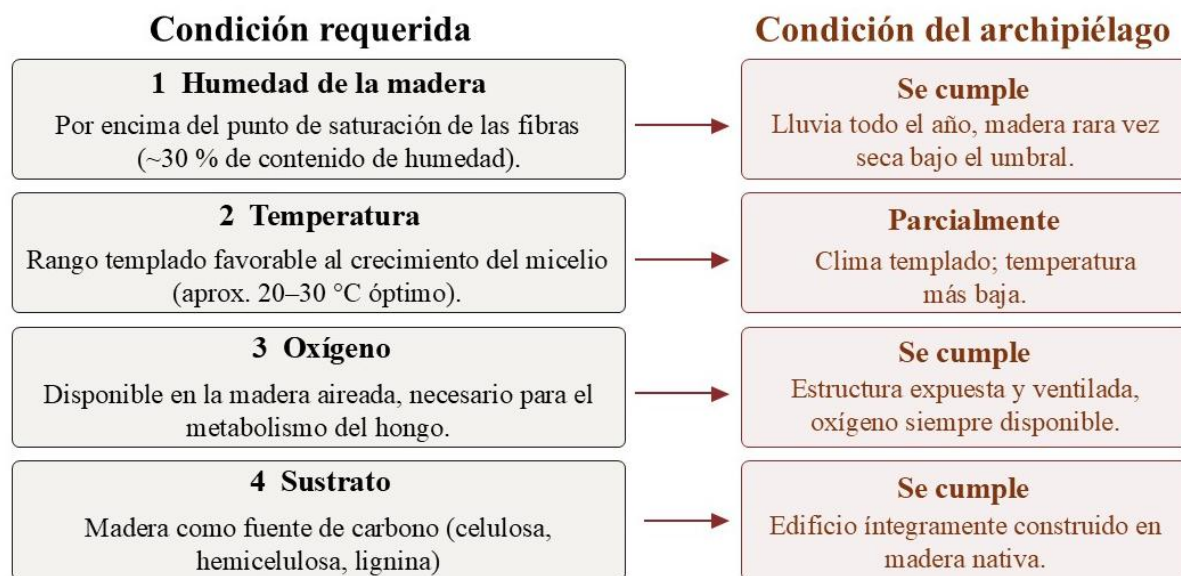
sistemas constructivos y la pericia aplicada del carpintero chilote. No se trata de edificios de piedra o albañilería con carpinterías de madera, sino de estructuras íntegramente construidas en madera nativa, esto es, estructura, revestimiento, cubierta y torre. La consecuencia es directa, toda pérdida de autenticidad material afecta el valor mismo por el cual el conjunto fue inscrito, de modo que la conservación del valor patrimonial y la conservación física de la madera son, en este caso, el mismo problema.

Las condiciones ambientales del archipiélago someten a las iglesias a una exposición climática crónica y sostenida. Dentro de ese contexto, el caso de estudio se emplaza en un clima oceánico lluvioso, clasificado como Cfb en el sistema de Köppen y Geiger, sin estación seca a lo largo del año. Para caracterizar este entorno se toma como referencia la estación Mocopulli de la Dirección Meteorológica de Chile, ubicada en la comuna de Castro, dentro del propio archipiélago, lo que la hace representativa de las condiciones a las que está expuesta la Iglesia de Ichuac. Los parámetros climáticos registrados se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros climáticos del archipiélago de Chiloé, estación Mocopulli, comuna de Castro. Fuente: elaboración propia a partir de Dirección Meteorológica de Chile, serie 2014 a 2025.

Parámetro	Valor registrado
Clasificación climática (Köppen y Geiger)	Oceánico lluvioso (Cfb), sin estación seca
Temperatura media anual	En torno a 10 °C
Precipitación media anual	Del orden de 2.000 mm
Régimen de precipitación	Máximos de mayo a agosto, sobre 280 mm mensuales
Humedad relativa media anual	85,9 %
Humedad relativa máxima	93 a 95 % en otoño e invierno
Radiación solar	Reducida
Vientos predominantes	Del sur y del norte

Estos parámetros no son solo descriptivos: coinciden con los requerimientos que un hongo xilófago necesita para establecerse en la madera. El desarrollo de estos organismos depende de cuatro factores, humedad, temperatura, oxígeno y sustrato, y el archipiélago los provee de forma simultánea o casi simultánea. La Figura 3 contrasta cada condición requerida con la que ofrece el entorno de Chiloé.



El archipiélago reúne casi todas las condiciones del biodeterioro a la vez. La temperatura templada solo ralentiza el proceso; no lo detiene.

Figura 3. Diagrama de condiciones requeridas para el establecimiento de hongos xilófagos y su correspondencia con las condiciones ambientales del archipiélago de Chiloé. Elaboración propia.

Una vez establecidos, estos hongos degradan la madera de distintas formas según su tipo de pudrición.



Efecto común: deterioro estructural progresivo

Pérdida de resistencia mecánica en los elementos constructivos. Una vez avanzado, la pieza ya no se recupera.

Figura 4. Diagrama clasificación de hongos xilófagos según el tipo de pudrición. Elaboración propia.

Frente a este escenario, la respuesta técnica disponible en el país ha sido mayoritariamente el uso de preservantes químicos industriales de impregnación, aplicados sobre madera de reemplazo. En el plano normativo, toda intervención sobre estos inmuebles requiere la autorización previa del Consejo de Monumentos Nacionales, conforme a la Ley N° 17.288 (1970). El propio Consejo ha establecido los criterios técnicos que rigen la intervención en el patrimonio construido (el diagnóstico previo del agente de deterioro, la mínima intervención y la sustitución documentada de piezas) en instrumentos como su Acta de Sesión Extraordinaria del 18 de octubre de 2023 (Consejo de Monumentos Nacionales, 2023).



Figura 5. Autorización del Consejo de Monumentos Nacionales para la reposición de emergencia de puntales en la Iglesia de Ichuac. Fuente: Consejo de Monumentos Nacionales (2026).

El caso reciente de la Iglesia de Ichuac ilustra la tensión que ello encierra. En abril de 2026, el Consejo de Monumentos Nacionales autorizó el reemplazo de emergencia de los puntales de apoyo de la torre por piezas de pino radiata impregnado en autoclave (IPV), esto es, madera tratada industrialmente con un preservante hidrosoluble admitido por la NCh819, grupo que incluye el arseniato de cobre cromatado (CCA) entre los autorizados para uso estructural. La decisión resuelve la urgencia estructural, pero introduce en un Monumento Nacional un material ajeno a la especie original y un tratamiento químico de fijación permanente, sobre un bien cuyo valor reside, como se ha señalado, en la autenticidad de su materialidad.

El registro en terreno, realizado en noviembre de 2025, documentó el estado de los puntales previo a la intervención. Estas piezas, incorporadas hacia 2005 en coigüe, una especie nativa de durabilidad natural moderada, apuntalaban los costados laterales oeste y este. Presentaban una pudrición avanzada tras cerca de veinte años a la intemperie y en contacto con el suelo (Figura 6).



Figura 6. Iglesia de Ichuac antes del reemplazo de los puntales, noviembre de 2025. (a) Fachada este con los puntales de refuerzo instalados hacia 2005; (b) detalle de un puntal de coigüe con pudrición avanzada tras cerca de dos décadas de exposición. Fotografías de la autora, 11 de noviembre de 2025.

Antecedentes internacionales

La conservación del patrimonio arquitectónico en madera no es un problema exclusivamente chileno, y la comparación con otros contextos permite situar la práctica nacional. En el plano doctrinal, ICOMOS estableció en 2017 *los Principles for the Conservation of Wooden Built Heritage* (Principios para la Conservación del Patrimonio Construido en Madera), que actualizan los principios de 1999 sobre estructuras históricas de madera. Estos establecen que la conservación de la arquitectura en madera debe fundarse en tres criterios, que son el mantenimiento preventivo, la mínima intervención y el empleo de materiales y técnicas compatibles con el original. Las experiencias internacionales muestran cómo estos principios se traducen en prácticas concretas.

En Noruega, la conservación de las *Stavkirke*, iglesias de madera de estructura de postes construidas mayormente entre los siglos XII y XIII, se organizó bajo el *Stave Church Preservation Programme de la Riksantikvaren* (2001 a 2015), que intervino las 28 iglesias sobrevivientes priorizando el mantenimiento preventivo y la mínima intervención por sobre las correcciones de gran escala (Bakken, 2016). Su régimen operativo combina inspección periódica, control de la humedad, reemplazo individualizado de tejas y la reaplicación de alquitrán de pino (en noruego, *tjære*), un recubrimiento superficial renovable elaborado según la técnica tradicional, antes que la sustitución de piezas o la impregnación con preservantes de síntesis. La comparación con Chiloé es pertinente en escala y tipología (templos de madera de dimensiones medias y uso religioso comunitario) y en la exposición a un clima húmedo y lluvioso, si bien las especies (pino silvestre de crecimiento lento



Figura 7. Iglesia de madera de Urnes, Ornes, Noruega, ejemplo de conservación de arquitectura religiosa en madera mediante mantención continua. Fuente Madera21. (2020). Iglesia de Urnes, Noruega [Fotografía de Robert Harding]. <https://www.madera21.cl>

frente a las nativas chilotas) y el régimen térmico difieren. El caso ilustra un principio antes que una receta, ya que la vida útil del material original se prolonga mediante un régimen de cuidado sostenido y tratamientos reversibles, no mediante un producto único ni mediante su reemplazo.

En Rumania, las ocho iglesias de madera de *Maramureș*, inscritas en la Lista del Patrimonio Mundial en 1999, enfrentan un problema análogo de biodeterioro en clima húmedo, lo que confirma que la vulnerabilidad de la madera patrimonial ante la humedad es un desafío compartido más allá del caso chileno (UNESCO, 1999).

En el ámbito normativo, la Unión Europea restringió mediante la Directiva 2003/2/CE (Comisión Europea, 2003) el uso de compuestos arsenicales en la preservación de madera destinada a usos residenciales y de contacto con el público, sobre la base del dictamen del Comité Científico de Toxicidad, Ecotoxicidad y Medio Ambiente (CSTEE, 1998). La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) condujo un proceso equivalente de retiro del CCA de aplicaciones residenciales (US EPA, 2002), y el US Forest Service ha desarrollado guías específicas para la preservación de madera en estructuras históricas, que subordinan la elección del preservante a los criterios de conservación patrimonial y a la evaluación caso a caso del nivel de intervención (Lebow y Anthony, 2012). El contraste con el caso chileno es lo relevante. Mientras en Europa y Estados Unidos el CCA fue restringido para usos de contacto humano hace dos décadas, en Chile sigue siendo la respuesta estándar, y se aplica incluso sobre madera destinada a un Monumento Nacional de uso comunitario.



Figura 8. Iglesia de madera de San Nicolás de Budești Josani (1643), Maramureș, Rumania, Patrimonio Mundial. Fotografía: Țecu Mircea Rareș (CC BY 2.5).

Problema

El problema abordado es el uso de preservantes químicos industriales, como el arseniato de cobre cromatado (CCA), contra los hongos xilófagos que deterioran los miembros de madera de las iglesias, cuya aplicación implica riesgos para la salud y el entorno y presenta baja compatibilidad con los principios de autenticidad material y mínima intervención que rigen estos Monumentos Nacionales.

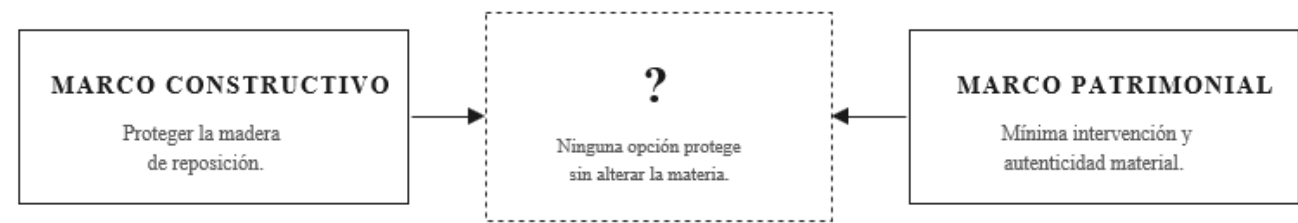
Las precauciones de manejo que la propia industria de la madera impregnada publica para el usuario dan cuenta de este perfil de riesgo. Las recomendaciones de uso de un proveedor nacional advierten que la madera tratada no debe emplearse como leña, pues su combustión libera compuestos tóxicos en el humo y las cenizas; que no debe entrar en contacto con alimentos ni con agua para beber; que su manipulación exige mascarilla, guantes y gafas frente al polvo de aserrín; y que su disposición final debe evitar la vía pública y los sitios eriazos por el riesgo que representa para la salud y el ambiente (Concón Maderas Impregnadas, s.f.). Que el resguardo provenga de quien produce y comercializa el material subraya que su toxicidad no es una objeción externa, sino una condición reconocida en su propio ciclo de uso.



*Figura 9. Daño visible en tejas de la iglesia.
Fotografía de la autora, noviembre 2025.*

El vacío es normativo. La NCh819:2019 admite estos preservantes sin distinguir contextos patrimoniales, y la Ley N° 17.288 exige autorización del Consejo de Monumentos Nacionales, pero no define qué productos son compatibles ni obliga a evaluar alternativas. La autorización del CMN, en abril de 2026, para reponer los puntales de la Iglesia de Ichuac con pino impregnado en planta evidencia la brecha: el mismo Consejo que consagra la mínima intervención autoriza, sobre un bien

de la Lista del Patrimonio Mundial, un preservante industrial sin un criterio que evalúe su compatibilidad con la autenticidad material.



Ese vacío es la oportunidad que aborda esta investigación.

Figura 10. Diagrama problema identificado. Elaboración propia.

Solución Propuesta

La solución propuesta es un método de aplicación de un biocida natural a base de aceite esencial de boldo (*Peumus boldus*) para la protección preventiva de los miembros de madera de las Iglesias Patrimoniales de Chiloé, con foco en la pieza de reposición y en la mantención periódica del inmueble. Plantea una alternativa de menor toxicidad, de origen local y de aplicación localizada.

Es importante precisar el alcance. No pretende recuperar piezas ya degradadas estructuralmente. Actúa sobre madera sana y desnuda, no sobre superficies ya impregnadas o pintadas: por una parte, sobre la pieza de reposición recién incorporada, como alternativa en los usos donde un tratamiento de penetración profunda no resulta indispensable; por otra, sobre la mantención periódica de los elementos sanos del inmueble, retardando el establecimiento del hongo y contribuyendo a prolongar la vida útil del elemento.

Cuatro atributos definen la propuesta:

- 1) De origen local. El boldo es una especie endémica de Chile, frente a un producto químico industrial.
- 2) De menor toxicidad. Frente a un preservante con metales pesados, presenta un perfil de menor toxicidad en aplicación externa, coherente con edificios de uso comunitario y con un territorio insular.
- 3) Aplicable en el propio edificio. No requiere trasladar la pieza a planta ni infraestructura industrial de impregnación.
- 4) No permanente y renovable. Tratamiento superficial que se reaplica en ciclos de mantención, coherente con el principio de mantenimiento preventivo que aplica el Consejo de

Monumentos Nacionales (Acta de Sesión Extraordinaria, 18 de octubre de 2023) y cuya base doctrinal se encuentra en ICOMOS (2017).



El boldo ocupa el vacío: protege la madera sin alterar su autenticidad.

Figura 11. Diagrama solución propuesta. Elaboración propia.

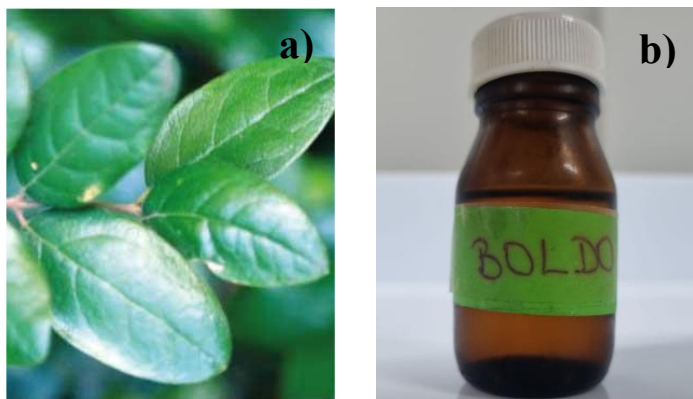


Figura 12. Boldo (Peumus boldus), especie empleada como principio activo del tratamiento. (a) Follaje de la planta; (b) aceite esencial de boldo al 8 % preparado para el ensayo. Fuente: (a) Rojas, G., Museo Nacional de Historia Natural; (b) fotografía de la autora.

Impacto de la investigación

El aporte central de esta investigación no es el biocida en sí, sino la mirada arquitectónica que ordena su aplicación. Desde ahí, el trabajo proyecta su impacto en cuatro dimensiones:

- 1) Social y Social y comunitario. Al no requerir infraestructura industrial, el método puede ser aplicado por la propia comunidad, devolviendo la conservación al mismo trabajo colectivo con que estas iglesias se construyeron y se han mantenido, y que forma parte del valor cultural reconocido por la UNESCO. Esta práctica es transversal a la Escuela Chilota, como ilustra la restauración comunitaria de otras iglesias del conjunto (Figura 13)



Figura 13. Andamios para la restauración de una iglesia de la Escuela Chilota, construidos por alumnos de la escuela de carpinteros de la comunidad de Quinchao, 1995. Fuente: Fundación Iglesias Patrimoniales de Chiloé.

- 2) Proyectual. Desde la arquitectura, la investigación produce instrumentos concretos de conservación preventiva: una cartografía de riesgo por orientación y exposición, las especificaciones de aplicación del biocida y un plan de mantención zonificado por ciclos. Con ello no introduce una lógica ajena, sino que ordena en un protocolo el saber preventivo



Figura 14. Modelo 3d de la Iglesia María de Ichuac. Elaboración propia, Rhino 8.

que la Escuela Chilota ya practicaba, la selección de especies según exposición, el respeto por la orientación y el reemplazo de piezas, traduciéndolo a criterios verificables.

- 3) Normativo. Muestra un caso concreto donde se logran conciliar dos exigencias que hoy chocan sobre un mismo bien: por un lado, la norma constructiva, que al restringir las especies durables originales obliga a reponer con maderas menos durables y a preservarlas; por otro, la norma patrimonial, que exige mínima intervención y mantenimiento preventivo.

- 4) Disciplinar. El problema no admite solución desde una sola disciplina. Esta investigación articula dos: el diagnóstico y los ensayos microbiológicos se desarrollaron en el Centro de Biotecnología de la Universidad, mientras que el levantamiento, la zonificación y el protocolo se formularon desde la arquitectura. El resultado es un método que ninguna de las dos habría producido por separado.



Figura 15. Observación de estado contrasacristía iglesia de Ichuac. Fuente: Fotografía de la autora.



Figura 16. Laboratorio. Aislamiento de Hongos extraídos de la Iglesia. Fuente: Fotografía de la autora.

ESTADO DEL ARTE

1. Biodeterioro fúngico en las iglesias de Chiloé

Investigations of Biodeterioration by Fungi in Historic Wooden Churches of Chiloé, Chile

[Investigaciones sobre el biodeterioro por hongos en iglesias históricas de madera de Chiloé, Chile]. Ortiz et al. (2014).

Este es el primer estudio realizado en Chile que identifica los microorganismos responsables del deterioro de la madera en las iglesias históricas de Chiloé. A partir de 158 muestras extraídas de ocho iglesias del archipiélago, siete de ellas Patrimonio Mundial, los autores aislaron y clasificaron los hongos presentes mediante secuenciación de la región ITS del ADN ribosomal, y caracterizaron el daño en la madera con microscopía electrónica de barrido.

Tabla 2. Iglesias de Chiloé incluidas en el estudio de biodeterioro fúngico de Ortiz et al. (2014), con su localidad y condición de Patrimonio Mundial. Fuente: elaboración propia a partir de Ortiz et al. (2014).

Iglesia	Localidad	Patrimonio Mundial
Nuestra Señora de Gracia de Nercón	Nercón	Sí
San Francisco	Castro	Sí
Santa María de Loreto de Rilán	Rilán	Sí
Santa María de Loreto	Achao	Sí
Nuestra Señora de Gracia	Quinchao	Sí
San Juan Bautista de San Juan de Coquihuil	San Juan	Sí
Iglesia de Nuestra Señora del Patrocinio	Tenaún	Sí
Calen	Calen	No

La iglesia Natividad de María de Ichuac, caso de estudio de esta investigación, no fue incluida en el muestreo de Ortiz et al. (2014), lo que refuerza la pertinencia de caracterizar de manera específica los hongos xilófagos presentes en ella.

Los resultados confirman la presencia de los tres tipos de pudrición (parda, blanca y blanda) y de 47 cultivos puros de taxones distintos, entre ellos *Coniophora puteana*, *Trametes versicolor* y *Postia dissecta*. Un hallazgo relevante para esta investigación es que la pudrición blanda degradó incluso el alerce y el ciprés de las Guaitecas, las especies de mayor durabilidad natural del conjunto, lo que demuestra que ni las maderas más resistentes están a salvo. El estudio reporta además dos géneros y seis especies por primera vez en Chile.

En cuanto a su aporte, concluye que la pudrición incipiente puede detenerse controlando la humedad, lo que respalda el enfoque preventivo por sobre la sustitución de piezas. Caracteriza el problema, pero no propone un tratamiento, y cierra solicitando de forma explícita investigación orientada a determinar los mejores métodos para controlar estos hongos.

2. Productos existentes en el mercado

El sistema de impregnación industrial domina el mercado chileno para proteger la madera de uso estructural o a la intemperie. Constituye el estándar frente al cual se plantea la alternativa de esta investigación, por lo que se revisa como el producto incumbente, considerando qué es, cómo se regula, cómo se usa y qué barreras presenta.

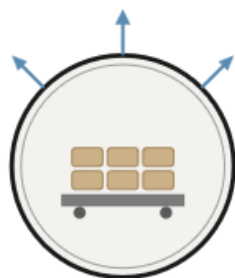
2.1 Madera preservada y su regulación

La madera preservada es aquella que ha incorporado un preservante químico en su estructura celular para resistir el ataque de hongos e insectos xilófagos. Su uso está regulado por la NCh819:2019 (Madera preservada. Clasificación según riesgo de deterioro en servicio y muestreo), y es obligatorio para las piezas de madera, estructurales o de terminación, según la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC, artículo 5.6.8). Los preservantes deben contar con autorización vigente del Servicio Agrícola y Ganadero (D.S. N° 3557 de 1980).

La impregnación se realiza en planta, mediante un ciclo de vacío y presión en autoclave. Un vacío inicial extrae el aire de las células de la madera; la autoclave se inunda con el preservante; se aplica presión para forzar el producto al interior de la pieza; y un vacío final retira el exceso. El resultado es una fijación permanente del preservante en la pared celular. La norma exige verificar dos parámetros: la retención (cantidad de preservante fijado, en kg/m^3) y la penetración (profundidad alcanzada, en mm).

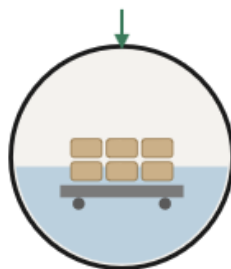
Impregnación en autoclave por ciclo de vacío y presión

Sección transversal del autoclave · proceso industrial en planta



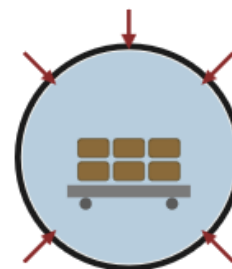
1 · Vacío inicial

Se extrae el aire y se prepara la madera.



2 · Inundación

El cilindro se llena con la solución preservante.



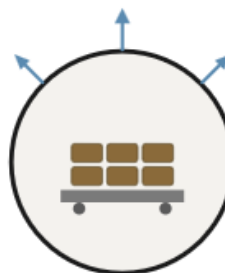
3 · Presión

La presión inyecta la solución en la madera.



4 · Trasvasije

Se retira la solución residual al estanque de trabajo.



5 · Vacío final

Retira el producto de la superficie: la madera sale seca, sin gotear.

Figura 17. Ciclo de impregnación en autoclave por vacío y presión (proceso IPV). Elaboración propia.

2.2 Productos y especificaciones de uso

La NCh819 admite distintos tipos de preservante, comercializados bajo marcas específicas. Los principales, según el manual del MINVU (2018), se resumen en la Tabla 3. Todas estas formulaciones tienen al cobre como base biocida, salvo el boro (Sillbor). El CCA es el único que suma cromo y arsénico, metales pesados que explican tanto su eficacia prolongada como su perfil de toxicidad.

Tabla 3. Principales preservantes de madera admitidos por la NCh819 en el mercado chileno. Fuente: elaboración propia a partir del manual del MINVU (2018).

Tipo	Nombre comercial	Ingrediente activo	Proveedor
CCA	WOLMAN® CCA	Óxidos de cobre, cromo y arsénico	Osmose y Lonza Quimetal
CA-B	Wolman E (CA-B)	Cobre y tebuconazol	Lonza Quimetal
μ CA C	Wolman E (μ CA C)	Cobre micronizado, tebuconazol y propiconazol	Lonza Quimetal
MCAz	Micropo	Cobre micronizado y tebuconazol	Osmose
SBX	Sillbor	Óxido de boro	Lonza Quimetal

El uso adecuado no depende solo del producto, sino de seleccionar el preservante y la dosis según la clase de riesgo del elemento, definida por su condición de uso y el agente de deterioro. La NCh819 establece seis clases de riesgo, cada una con una retención mínima creciente. Para el CCA, la retención exigida pasa de 4,0 kg/m³ en las clases R1 a R3, a 6,4 kg/m³ en R4 y 9,6 kg/m³ en R5. La ejecución se verifica en terreno mediante reactivos colorimétricos: el cromo azurol vira a azul en

presencia de preservantes de cobre, y la cúrcuma a rojo en presencia de boro. Una pieza a la intemperie y en contacto con el suelo, como los puntales de una torre, se clasifica en las categorías de mayor riesgo, lo que exige las mayores retenciones.

Tabla 4. Clases de riesgo de deterioro de la madera según la NCh819. Fuente: elaboración propia a partir de NCh819:2019.

Clase	Condición de uso	Agente de deterioro
R1	Interiores secos, sobre el nivel del suelo	Insectos, incluida la termita subterránea
R2	Interiores con posibilidad de humedad, mal ventilados	Hongos de pudrición e insectos
R3	Exteriores o interiores expuestos al clima	Hongos de pudrición e insectos
R4	En contacto con el suelo, agua dulce esporádica	Hongos de pudrición e insectos
R5	En contacto con el suelo, estructural crítico, agua dulce	Hongos de pudrición e insectos
R6	En contacto con agua marina	Horadores marinos, hongos e insectos

2.3 Barreras para el contexto patrimonial

El sistema es eficaz y está normado, pero presenta límites decisivos para un contexto patrimonial. El CCA, el más difundido, incorpora arsénico y cromo, con los riesgos sanitarios y ambientales asociados. La fijación es permanente e irreversible, y el tratamiento exige trasladar la pieza a planta, ya que la impregnación en autoclave no puede ejecutarse *in situ*. A ello se suma que su uso correcto exige condiciones estrictas de manejo (equipo de protección personal, prohibición de quemar la

madera, evitar el contacto con alimentos o agua), que rara vez se cumplen en la práctica. Esa combinación de toxicidad, permanencia y aplicación en planta constituye la principal barrera del sistema frente a un bien patrimonial.

3. Soluciones alternativas actuales

La restricción internacional de los preservantes de metales pesados y la creciente conciencia ambiental han impulsado la búsqueda de protectores de la madera de bajo impacto como extractos vegetales, metabolitos secundarios y, de manera destacada, aceites esenciales. El interés de estos últimos radica en combinar actividad biológica con biodegradabilidad y origen renovable. Los antecedentes que siguen recogen la evidencia experimental sobre su eficacia, su uso en conservación patrimonial y los estudios sobre flora nativa chilena que sustentan la elección de la especie de este estudio.

3.1 Evidencia experimental sobre madera

Plant essential oils for environment-friendly protection of wood objects against fungi [Aceites esenciales de plantas para la protección ecológica de objetos de madera contra hongos]. Bahmani y Schmidt (2018).

Es el antecedente más próximo a esta investigación, publicado en Chile y que cita el caso de las iglesias de Chiloé. Aplicó dieciséis aceites esenciales sobre probetas de *Fagus orientalis* y *Pinus taeda* mediante impregnación al vacío, infectándolas luego con mohos (*Aspergillus niger*, *Penicillium commune*), pudrición parda (*Coniophora puteana*), pudrición blanca (*Trametes versicolor*), pudrición blanda (*Chaetomium globosum*) e infección natural por esporas del aire. Los aceites de lavanda, lemongrass y tomillo resultaron los más efectivos contra la totalidad de los hongos ensayados. Es el único antecedente que cubre los tres tipos de pudrición identificados en Chiloé, y dos de sus hongos (*Coniophora puteana* y *Trametes versicolor*) coinciden con los aislados por Ortiz et al. (2014) en las propias iglesias. Su límite: trabaja con aceites comerciales sobre maderas europeas y norteamericanas y con cepas de colección, no con especies nativas chilenas ni flora local.

3.2 Aceites de barrera no biocidas

Efficacy of linseed- and tung-oil-treated wood against wood-decay fungi and water uptake [Eficacia de la madera tratada con aceite de linaza y de tung frente a hongos de pudrición y absorción de agua]. Humar y Lesar (2013).

El aceite de tung, extraído de la semilla del árbol de tung (*Vernicia fordii*), es un aceite secante que penetra en la madera y polimeriza formando una película transparente e impermeable. Los autores evaluaron madera de abeto de Noruega y de haya tratada con aceite de tung y de linaza frente a hongos de pudrición, y constataron que la madera tratada queda protegida frente a la pudrición parda y blanca, con mejor desempeño del aceite de tung que del de linaza. El propio estudio enmarca estos aceites como repelentes de agua de carácter no biocida, orientados a aplicaciones de exposición moderada.

Su aporte es demostrar que un aceite natural de barrera puede complementar o sustituir tratamientos biocidas en ciertos usos. Presenta, sin embargo, tres límites. Primero, su mecanismo es la impermeabilización y no la acción biocida sobre el hongo, por lo que opera de manera distinta, y en principio complementaria, a un biocida. Segundo, procede de una especie no nativa, de origen asiático. Tercero, el propio estudio reporta que el aceite es tóxico hasta su completa polimerización. Constituye, por tanto, un antecedente de protección natural por barrera, cuyo desempeño frente a condiciones de mayor exposición no fue evaluado.

3.3 Aplicación en conservación patrimonial

Essential oils as natural biocides in conservation of cultural heritage [Aceites esenciales como biocidas naturales en la conservación del patrimonio cultural]. Palla et al. (2020).

Aplicó los volátiles de los aceites esenciales de orégano (*Origanum vulgare*) y tomillo (*Thymus vulgaris*), caracterizados por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS), para contrarrestar el biodeterioro de obras de arte en madera colonizadas por el hongo *Aspergillus flavus* y por el insecto *Anobium punctatum*. Demuestra que, en la última década, los aceites esenciales se han incorporado a la conservación del patrimonio como estrategia de conservación verde, por su

baja toxicidad. Es el antecedente que valida el uso de aceites esenciales específicamente sobre madera patrimonial. Su límite: se aplica a obras de arte en madera, es decir, bienes muebles a escala de objeto, y no a madera estructural tratada *in situ* en un edificio.

3.4 Compuestos bioactivos de especies nativas chilenas

Actividad de aceites esenciales de canelo, queule, bailahuén y culén frente a hongos fitopatógenos. Becerra et al. (2010).

Ensayó los aceites esenciales de canelo (*Drimys winteri*), queule (*Gomortega keule*), bailahuén (*Haplopappus baylahuen*) y culén (*Psoralea glandulosa*) frente a hongos fitopatógenos, cada uno sobre un hongo distinto, con inhibiciones del 54 % para el queule, 39 % para el culén, 38 % para el bailahuén y 36 % para el canelo. Establece que la flora nativa chilena posee aceites esenciales con actividad antifúngica documentada. Su límite: los ensayos se orientan a hongos fitopatógenos, no a los hongos de pudrición de la madera.

Fungistatic activity of essential oils extracted from *Peumus boldus*, *Laureliopsis philippiana* and *Laurelia sempervirens* [Actividad fungistática de aceites esenciales extraídos de *Peumus boldus*, *Laureliopsis philippiana* y *Laurelia sempervirens*]. Bittner et al. (2009).

Analizó la actividad fungistática de los aceites esenciales de tres especies chilenas de la familia Monimiaceae, entre ellas el boldo (*Peumus boldus*) y la tepa (*Laureliopsis philippiana*), y determinó que el componente principal del aceite de boldo es el ascaridol. Aporta la caracterización química que respalda la actividad antifúngica del boldo. Su límite: se ensaya en condiciones de laboratorio sobre hongos de referencia, no sobre hongos de pudrición de la madera ni en un contexto constructivo.

Antifungal impact of volatile fractions of *Peumus boldus* and *Lippia turbinata* on *Aspergillus* section Flavi [Impacto antifúngico de las fracciones volátiles de *Peumus boldus* y *Lippia turbinata* sobre *Aspergillus* sección Flavi]. Passone y Etcheverry (2014).

Evaluó la fracción volátil del aceite esencial de boldo (*Peumus boldus*) frente a hongos del género *Aspergillus*, y reportó que el boldo inhibió cerca del 90 % del crecimiento de dos de estas especies. Aporta evidencia directa y cuantificada de la actividad antifúngica del boldo, la especie de este estudio. Su límite: el ensayo se realiza en el ámbito de la microbiología de alimentos, no sobre hongos de pudrición de la madera ni en conservación patrimonial.

3.5 Justificación de la especie seleccionada

Los estudios revisados muestran que el tomillo, la lavanda y el lemongrass son los aceites esenciales más eficaces (Bahmani y Schmidt, 2018). Sin embargo, esta investigación eligió el boldo (*Peumus boldus*), y no por ser el más potente, sino porque es el que mejor responde a los objetivos patrimoniales y territoriales del estudio.

El aceite esencial de boldo tiene actividad antifúngica comprobada. Contiene ascaridol, p-cimeno y eucaliptol, compuestos que inhiben el crecimiento de distintos hongos (Bittner et al., 2009; Passone y Etcheverry, 2014). En uno de estos estudios, el boldo inhibió cerca del 90 % del crecimiento de dos hongos del género *Aspergillus*.

A esa eficacia se suma su condición de especie endémica de Chile, que crece de forma natural en el bosque esclerófilo de la zona central (Rojas, 2017). Esto lo hace coherente con un modelo de conservación basado en recursos del propio territorio, a diferencia de los aceites importados. Además, su hoja se recolecta habitualmente en el país y no depende de importación, lo que hace viable la aplicación comunitaria que propone esta investigación.

Por último, es una alternativa de menor impacto ambiental. Frente a un preservante con metales pesados de permanencia indefinida, el boldo es biodegradable y menos persistente. No es, sin embargo, totalmente inocuo, ya que uno de sus compuestos, el ascaridol, es tóxico si se ingiere en dosis altas, por lo que su uso se plantea solo sobre madera estructural y nunca en contacto con alimentos.

En síntesis, el boldo se eligió por una combinación de criterios, eficacia, origen endémico, disponibilidad, composición activa y seguridad, y no solo por su potencia. Los aceites comerciales son más eficaces, pero ajenos al territorio; el boldo, en cambio, une una eficacia suficiente con un sentido patrimonial y local.

4. Permanencia del tratamiento

Nano-chitosan formulations and essential oil encapsulation for sustainable wood protection: A comprehensive review [Formulaciones de nanoquitosano y encapsulación de aceites esenciales para la protección sostenible de la madera: una revisión exhaustiva]. Ahmed et al. (2026).

Una línea reciente de investigación explora el uso de nanopartículas de base biopolimérica, en particular de quitosano, como vehículo de los aceites esenciales, con el fin de mejorar su penetración en la microestructura de la madera y su resistencia a la lixiviación. Esta revisión del campo señala que los estudios publicados entre 2022 y 2024 reportan una penetración más profunda que la de los preservantes convencionales y mejoras en la resistencia a la lixiviación de hasta un 50 % en algunas formulaciones. Estos desarrollos responden a la principal limitación de los aceites esenciales, su volatilidad y lixiviación.

Su límite: se sitúan en escala de laboratorio y no resuelven aún la aplicación patrimonial. Marcan la frontera tecnológica del campo, pero corresponden a una vía de mejora de la permanencia que excede el alcance de un tratamiento superficial renovable.

5. Precedentes en conservación de arquitectura patrimonial en madera

Las experiencias internacionales de conservación de arquitectura en madera muestran cómo los principios de mantenimiento preventivo y mínima intervención se traducen en prácticas concretas de cuidado sostenido.

Programa de Preservación de las Stave Churches, Noruega (2001 a 2015). Bakken (2016).

Programa estatal que intervino veintiocho iglesias medievales de madera, una de ellas Patrimonio Mundial (Urnes), sobre la base del mantenimiento preventivo con intervenciones compatibles, reversibles y de mínimo impacto, y de la protección mediante alquitranado tradicional. Ilustra un enfoque de conservación centrado en el cuidado sostenido y en tratamientos superficiales renovables por sobre la sustitución de piezas. Su límite: opera sobre una especie y un régimen climático distintos a los del caso chileno, por lo que constituye un referente de principio antes que un modelo directamente trasladable.

Guide for Use of Wood Preservatives in Historic Structures [Guía para el uso de preservantes de madera en estructuras históricas]. Lebow y Anthony (2012).

Guía de preservantes para estructuras históricas que establece una jerarquía clara: primero el diseño, las prácticas constructivas y el mantenimiento; el preservante solo si la humedad no puede evitarse. Subordina la elección del preservante a los criterios de conservación patrimonial y a la evaluación caso a caso del nivel de intervención. Su límite: es un instrumento de otro contexto normativo, referencial en sus principios más que en su aplicación directa.

6. Análisis de la propiedad intelectual e industrial

El estado de la propiedad industrial muestra hacia dónde se ha movido el desarrollo de productos en este campo, desde la investigación hacia la protección de invenciones.

Essential oils inhibit mold on wood [Aceites esenciales que inhiben el moho en la madera]. Yang y Clausen (2015), patente US8986757B2.

Método para tratar la madera e inhibir el crecimiento de hongos de moho mediante tratamiento superficial con aceites esenciales, por inmersión, pulverización, brocha y exposición a vapores, como vías de baja toxicidad. Cedita al Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA). Constituye el precedente directo del método de aplicación propuesto, ya que reconoce las mismas vías de aplicación superficial que este estudio adopta.

Phytosanitary composition comprising essential oils that potentiate antifungal activity [Composición fitosanitaria que comprende aceites esenciales que potencian la actividad antifúngica]. Biofungitek (2020), patente US10813360B2.

Composición basada en el efecto sinérgico de los aceites esenciales para potenciar agentes fungicidas conocidos (bicarbonatos y compuestos de cobre). Su límite: evidencia el tránsito del campo desde la investigación hacia el desarrollo de producto, pero combina los aceites con biocidas convencionales, no como principio activo autónomo.

Wood preserving composition and preparation method thereof [Composición para la preservación de la madera y su método de preparación]. Universidad del Bío-Bío y CIPA (2024), patente WO2024000081.

Composición preservante para madera desarrollada en Chile, a base de nanopartículas de cobre (de 10 a 50 nm) y nanocristales de celulosa. Su límite: es un antecedente de innovación local, pero mantiene el cobre como principio activo y no está orientada a la aplicación patrimonial.

Síntesis de la brecha

La revisión permite constatar que cada línea de investigación aporta una pieza del problema, pero ninguna resuelve el cruce que esta investigación aborda.

Ortiz et al. (2014) caracterizaron los hongos que deterioran las iglesias de Chiloé y solicitaron de forma explícita investigación orientada a su control, sin proponer un tratamiento. Esta investigación responde directamente a ese llamado.

Los estudios sobre aceites esenciales (Bahmani y Schmidt, 2018; Yang y Clausen, 2007; Pánek et al., 2014) demostraron su eficacia frente a hongos xilófagos, pero trabajaron sobre maderas comerciales europeas y norteamericanas y con cepas de colección, no sobre especies nativas chilenas ni con los hongos aislados de un monumento. Además, Pánek et al. (2014) advierten que esa eficacia es marginal frente a la pudrición blanca, uno de los tipos presentes en Chiloé, lo que marca un límite que este estudio reconoce.

Los aceites naturales de barrera (Humar y Lesar, 2013) demostraron proteger la madera por impermeabilización, pero operan mediante un mecanismo distinto al biocida, sobre una especie no nativa y con toxicidad hasta su polimerización, por lo que resuelven un problema diferente al que aborda esta investigación.

Los antecedentes de aplicación patrimonial (Palla et al., 2020) validaron el uso de aceites esenciales sobre madera histórica, pero a escala de objeto, en bienes muebles, y no sobre madera estructural tratada *in situ* en el edificio.

Los estudios sobre flora nativa chilena y sobre el boldo (Becerra et al., 2010; Bittner et al., 2009; Passone y Etcheverry, 2014) confirmaron su actividad antifúngica, pero frente a hongos fitopatógenos o en microbiología de alimentos, no frente a los hongos de pudrición de la madera ni en conservación patrimonial.

En el plano de la permanencia y la propiedad industrial, la encapsulación en nanoquitosano (Ahmed et al., 2026) y las patentes revisadas (Yang y Clausen, 2015; Biofungitek, 2020; Universidad del Bío-Bío y CIPA, 2024) marcan la frontera tecnológica del campo, pero se sitúan en escala de laboratorio o mantienen el cobre como principio activo, sin orientarse a la aplicación patrimonial. Los precedentes de conservación (Bakken, 2016; Lebow y Anthony, 2012) aportan el principio del cuidado sostenido y el tratamiento renovable, pero sobre especies y contextos distintos al chileno.

De esta convergencia se desprende la brecha que esta investigación busca abordar: no existe un antecedente que evalúe un aceite esencial de una especie nativa chilena, aplicado *in situ*, frente a los hongos xilófagos que deterioran la madera estructural de las iglesias patrimoniales de Chiloé. Este vacío, sumado a la solicitud explícita de Ortiz et al. (2014) de investigar métodos de control, define la oportunidad de investigación y el aporte original del presente estudio.

MARCO DE REFERENCIA

Marco normativo nacional

Normativa constructiva

La NCh789/1 clasifica las especies madereras según su durabilidad natural frente a hongos e insectos xilófagos, y constituye el punto de partida, pues define qué maderas requieren preservación. Sobre esa base, la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, en su artículo 5.6.8, establece la obligación de preservar toda madera no durable destinada a uso estructural, convirtiendo la preservación en un requisito legal de la construcción. La NCh819:2019 clasifica el riesgo de biodeterioro según las condiciones de exposición, definiendo seis clases de riesgo (R1 a R6) y las retenciones y penetraciones mínimas exigidas para cada una, junto con los preservantes admitidos para satisfacerlas. La NCh790, por su parte, clasifica y define la composición y los requisitos de esos preservantes, es decir, establece qué productos pueden usarse y con qué características. Cierra este cuerpo el Decreto Supremo N°3557 de 1980, que exige que todo preservante empleado cuente con autorización vigente del Servicio Agrícola y Ganadero. En conjunto, este marco resuelve la preservación por una sola vía, la impregnación con preservantes sintéticos industriales, sin contemplar alternativas de origen natural ni incorporar criterio patrimonial alguno respecto de qué producto puede introducirse en un Monumento Nacional.

Tabla 5. Marco normativo constructivo aplicable a la conservación de la madera. Fuente: elaboración propia.

Norma o instrumento	Establece	Qué implica para el caso
Normativa constructiva		
NCh789/1	Define los métodos para clasificar la durabilidad natural de la madera	Define qué maderas requieren preservación obligatoria
OGUC Art. 5.6.8	Obliga a preservar la madera no durable de uso estructural	Convierte la preservación en un requisito legal de la construcción
NCh819:2019	Clasifica el riesgo de biodeterioro según exposición, en seis clases (R1 a R6)	Sitúa a Ichuac en riesgo por exposición a la intemperie y a hongos de pudrición
D.S. N°3557 (1980)	Exige autorización vigente del SAG para todo preservante	Toda alternativa natural debería registrarse ante el SAG

Normativa patrimonial

La Ley N°17.288 de Monumentos Nacionales establece que toda intervención sobre un Monumento Histórico requiere autorización previa del Consejo de Monumentos Nacionales, y fija las sanciones aplicables ante intervenciones no autorizadas. Sin embargo, la ley define el procedimiento, pero no especifica qué materiales o productos resultan compatibles con el bien protegido. Ese vacío ha sido abordado parcialmente por la práctica del propio Consejo. En su Acta de Sesión Extraordinaria del 18 de octubre de 2023, al pronunciarse sobre la intervención de bienes patrimoniales, el CMN estableció que los productos empleados en la conservación deben ser inocuos, de baja toxicidad, compatibles con los materiales del soporte, estables en el tiempo y previamente testeados para la conservación, desaconsejando el uso de productos cuyas propiedades se desconozcan o que no puedan retirarse tras su aplicación (CMN, 2023). Un preservante como el arseniato de cobre cromatado, que

incorpora al soporte metales pesados tóxicos y persistentes como el arsénico y el cromo, y cuya aplicación es irreversible, se sitúa en tensión con cada uno de esos criterios. No obstante, el Consejo no se pronuncia sobre preservantes específicos, de modo que su incompatibilidad constituye una inferencia derivada de aquel criterio y no una prohibición expresa.

Tabla 6. Marco normativo patrimonial aplicable a la intervención de Monumentos Nacionales. Fuente: elaboración propia.

Norma o instrumento	Establece	Qué implica para el caso
Normativa patrimonial		
Ley N°17.288 de Monumentos Nacionales	Toda intervención sobre un Monumento requiere autorización previa del CMN	Encuadra legalmente cualquier obra sobre el bien, sin calificar los materiales admisibles
Acta CMN, 18 de octubre de 2023	Fija los criterios técnicos de intervención: inocuidad, baja toxicidad, compatibilidad, estabilidad y reversibilidad	El CCA queda en tensión con esos criterios; su incompatibilidad es una inferencia, no una prohibición expresa

Normativa ambiental

Las especies que otorgan a estas iglesias su durabilidad, el alerce y el ciprés de las Guaitecas, están sujetas a restricción legal de corta bajo estatutos distintos. El alerce (*Fitzroya cupressoides*), declarado Monumento Natural mediante el Decreto Supremo N°490, tiene prohibición de corta de ejemplares vivos en el territorio nacional. El ciprés de las Guaitecas (*Pilgerodendron uviferum*) queda sujeto a la Ley N°20.283 sobre Recuperación del Bosque Nativo y Fomento Forestal, que condiciona su corta a un plan de manejo aprobado por CONAF. En la práctica, ello vuelve legalmente inviable obtener estas especies para nuevas piezas de reposición, lo que obliga a recurrir a especies de menor durabilidad y, con ello, activa la obligación de impregnar establecida por la normativa constructiva.

Tabla 7. Marco normativo ambiental sobre las especies durables originales. Fuente: elaboración propia.

Norma o instrumento	Establece	Qué implica para el caso
Normativa ambiental		
Decreto Supremo N°490 (Monumento Natural, alerce)	Prohíbe la corta de ejemplares vivos de alerce en el territorio nacional	Impide reponer con alerce, la especie durable original
Ley N°20.283 sobre Recuperación del Bosque Nativo (ciprés de las Guaitecas)	Condiciona la corta del ciprés a un plan de manejo aprobado por CONAF	Empuja a especies de menor durabilidad y activa la obligación de impregnar

Marco normativo internacional

Instrumentos de protección

La protección internacional del conjunto deriva de la Convención sobre la Protección del Patrimonio Mundial, Cultural y Natural de la UNESCO (1972), en virtud de la cual dieciséis iglesias del archipiélago fueron inscritas en la Lista del Patrimonio Mundial en el año 2000. La Declaración de Valor Universal Excepcional del Sitio reconoce que el atributo esencial de estos templos reside en su materialidad, es decir en la madera, los sistemas constructivos y la pericia del carpintero chilote, de modo que toda pérdida de autenticidad material compromete el valor mismo por el cual el conjunto fue inscrito.

Tabla 8. Instrumentos internacionales de protección del Sitio. Fuente: elaboración propia.

Instrumento	Establece	Qué implica para el caso
Protección del Sitio		
Convención del Patrimonio Mundial, UNESCO (1972)	Marco de inscripción y protección del Sitio	Fundamenta la inscripción de las dieciséis iglesias en el año 2000
Declaración de Valor Universal Excepcional	Reconoce la materialidad en madera como atributo esencial del Sitio	Toda pérdida de autenticidad material afecta el valor que sustenta la inscripción

Instrumentos doctrinales

La conservación de estos bienes se orienta, además, por los instrumentos doctrinales de referencia internacional. La Carta de Venecia (1964) establece los principios de mínima intervención y de diferenciación de los agregados, y el Documento de Nara sobre Autenticidad (1994) consagra el resguardo de la autenticidad en los materiales y las técnicas tradicionales. Específicamente para la arquitectura en madera, los principios de ICOMOS sobre patrimonio construido en madera, formulados en 1999 y actualizados en 2017, establecen que la conservación debe fundarse en el mantenimiento preventivo, en la retención de la mayor cantidad posible de material existente y en el empleo de materiales y técnicas compatibles cuando la sustitución resulte inevitable. Estos principios constituyen la base doctrinal de los criterios que el Consejo de Monumentos Nacionales aplica, con fuerza vinculante, en el ámbito nacional.

Tabla 9. Instrumentos doctrinales internacionales de conservación. Fuente: elaboración propia.

Instrumento	Establece	Qué implica para el caso
Carta de Venecia (1964) y Documento de Nara (1994)	Mínima intervención, diferenciación y resguardo de la autenticidad material	Limitan el alcance admisible de la intervención; el CCA altera la materia original
Principios para la Conservación del Patrimonio Construido en Madera, ICOMOS (2017)	Mantenimiento preventivo, retención del material existente y compatibilidad de los materiales de sustitución	Base doctrinal de los criterios que el CMN aplica, con fuerza vinculante, en el ámbito nacional

MARCO CIENTÍFICO

Hipótesis de la investigación

El aceite esencial de boldo (*Peumus boldus*), aplicado sobre madera de coigüe (*Nothofagus dombeyi*) sana, previene la aparición temprana de los hongos xilófagos aislados de la Iglesia Natividad de María de Ichuac durante el período de observación, en condiciones controladas de laboratorio.

Esta hipótesis se plantea en el plano experimental y constituye la base empírica sobre la cual se sustenta el aporte arquitectónico de la investigación, que consiste en formular un método de conservación preventiva compatible con los principios de mínima intervención y autenticidad material del patrimonio.

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar un método de aplicación de un biocida natural a base de aceite esencial de boldo (*Peumus boldus*) para la protección preventiva de los miembros de madera de las Iglesias Patrimoniales de Chiloé, con foco en la pieza de reposición y en la mantención periódica del inmueble, como alternativa de menor toxicidad, de origen local y de aplicación localizada.

Objetivo Específico

OE 01. Identificar las especies de madera de la estructura y envolvente del caso de estudio, diagnosticar sus miembros críticos según exposición y extraer muestras de los hongos xilófagos presentes en ellos.

OE 02. Implementar un protocolo experimental para evaluar el efecto preventivo del aceite esencial de boldo, comparando muestras tratadas y no tratadas en condiciones controladas de humedad y temperatura.

OE 03. Formular y evaluar un protocolo de aplicación del biocida en miembros destinados a mantención y reposición, contrastando su conformidad con la lógica constructiva y los criterios de intervención patrimonial.

METODOLOGÍA

Estrategia metodológica

La investigación se estructura en cuatro etapas secuenciales que corresponden a los objetivos específicos declarados. Las Etapas 1 y 2 responden a OE 01, la Etapa 3 a OE 02 y la Etapa 4 a OE 03. El levantamiento arquitectónico, el muestreo fúngico y el registro fotográfico fueron realizados por la autora en terreno en noviembre de 2025. El aislamiento de las cepas y el ensayo experimental de la Etapa 3 se ejecutaron en el Centro de Biotecnología de la Universidad Técnica Federico Santa María, a cargo de Camila Murúa, conforme al informe de resultados de fecha 12 de junio de 2026.



Figura 18. Diagrama de estrategia metodológica. Elaboración propia.

Etapa 1. Levantamiento

La primera etapa tuvo por finalidad establecer el estado material del caso de estudio y determinar cuáles de sus elementos de madera concentran el riesgo de biodeterioro. De ella proviene el marco físico sobre el cual se define, en la cuarta etapa, el ámbito de aplicación del protocolo.

El levantamiento se realizó en terreno durante los días 11 y 12 de noviembre de 2025. La primera jornada se destinó a la inspección visual, la observación general y la entrevista, y la segunda a la extracción de muestras y al registro fotográfico de detalle. El trabajo consistió en inspección visual y registro fotográfico sistemático, distinguiendo entre elementos estructurales, de envolvente y de terminación, y registrando el régimen de terminación superficial de cada uno. Tomó como base documental la planimetría de arquitectura existente elaborada por la arquitecta Natalia Cruz Campos para la Fundación Iglesias Patrimoniales de Chiloé, con fecha 31 de mayo de 2025. Se consignó la orientación cardinal de cada fachada junto con la presencia o ausencia de recubrimiento superficial en los elementos expuestos, dado que ambas condiciones determinan tanto el riesgo de colonización como la aptitud de la superficie para recibir el tratamiento propuesto.

Como parte del levantamiento se realizó, además, una entrevista semiestructurada a José Luis Catalán, presidente de la Asociación de Carpinteros Patrimoniales de Chiloé, con el fin de recoger los criterios tradicionales de selección, preparación y disposición de la madera en la construcción chilota. La entrevista se efectuó de manera presencial el 11 de noviembre de 2025, previo consentimiento verbal del entrevistado para citar su testimonio con nombre y cargo. Se organizó en torno a cuatro ejes, que abordaron los criterios de selección de la madera, el momento y las condiciones de tala, la preparación de las piezas y la asignación de cada especie según su posición en el edificio, y se registró mediante notas tomadas durante la conversación. La información se analizó por contenido temático y se contrastó con la evidencia científica disponible y con la verificación material realizada en terreno.

Caso de estudio



Figura 19. Vista general de la Iglesia Natividad de María de Ichuac, ubicada en la comuna de Puqueldón, Isla Lemuy, Archipiélago de Chiloé. Fuente: Ruta de las Iglesias de Chiloé.

La Iglesia Natividad de María de Ichuac se emplaza en el extremo poniente de la Isla Lemuy, comuna de Puqueldón. El templo actual fue una obra comunitaria en la que, según testimonios locales, trabajaron alrededor de ciento cincuenta personas durante cinco años (Ruta de las Iglesias de Chiloé, s.f.), y fue bendecido el 8 de diciembre de 1880 con ocasión de la celebración de la Purísima, sobre un asentamiento que ya contaba con capilla desde mediados del siglo XVIII. Fue declarada Monumento Histórico mediante Decreto Exento N°222 del 10 de agosto de 1999 e inscrita en la Lista del Patrimonio Mundial de la UNESCO en el año 2000.

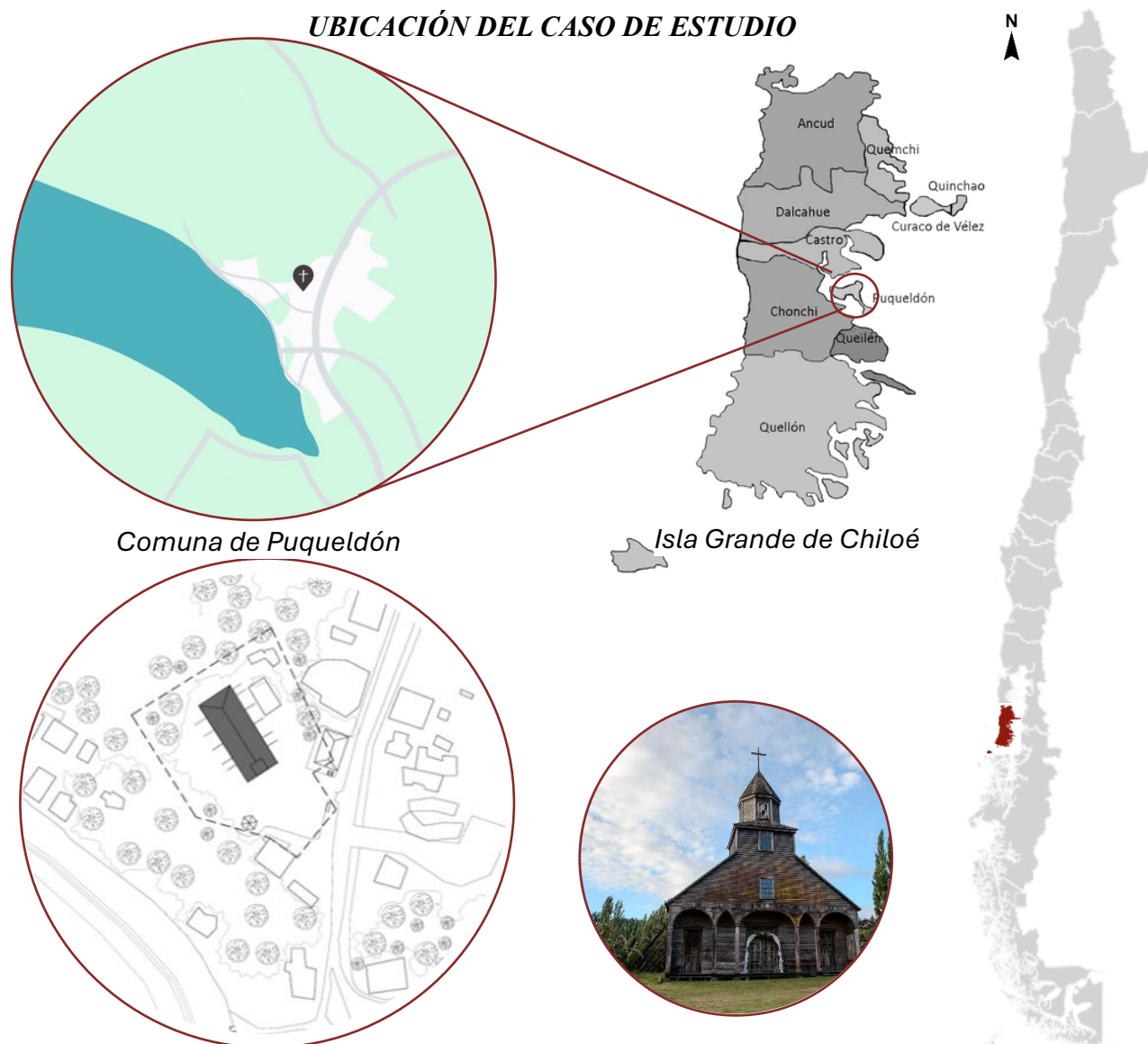


Figura 20. Ubicación de la Iglesia Natividad de María de Ichuac en sus distintas escalas. Elaboración propia sobre base cartográfica esquema referencial.



Figura 21. Estado general del inmueble. (a) fachada frontal completa, con el pórtico de tres arcos ojivales rebajados y la torre; (b) elevación lateral larga, con puntales inclinados. Fotografías de la autora.

El emplazamiento de la Iglesia Natividad de María de Ichuac se dispone sobre una explanada, un espacio abierto que la antecede, escenario de las fiestas religiosas y punto histórico de arribo de los misioneros durante la Misión Circular.

Esta relación con el paisaje es parte del valor patrimonial del conjunto. La Iglesia, en el extremo poniente, se inserta en este patrón, ya que se emplaza sobre el borde del estero de Ichuac, en posición elevada, entre lomas desde las cuales sobresale su torre, visible desde el camino y las laderas de la ensenada, en una relación de comunión entre el paisaje natural y lo construido (Consejo de Monumentos Nacionales, 2023).

Condiciones climáticas

Condiciones climáticas del emplazamiento

La Iglesia de Ichuac se emplaza en la comuna de Puqueldón, Isla Lemuy, dentro del mismo régimen oceánico lluvioso descrito para el archipiélago. La caracterización se apoya en la estación Mocopulli (Castro), la más cercana con registros históricos dentro de la isla, que confirma precipitaciones sobre los 2.000 mm anuales, humedad relativa media cercana al 86 % y máximos invernales entre el 93 y el 95 % (Dirección Meteorológica de Chile, s.f.).

Sobre estas condiciones generales, el comportamiento del deterioro en Ichuac responde a la orientación del edificio. Las caras norte y poniente, más expuestas a la incidencia del viento y la lluvia, concentran la mayor carga de humedad, lo que coincide con el diagnóstico del deterioro registrado en terreno y con el testimonio del oficio. Esta distribución desigual de la exposición fundamenta el tratamiento diferenciado por orientación que propone esta investigación.

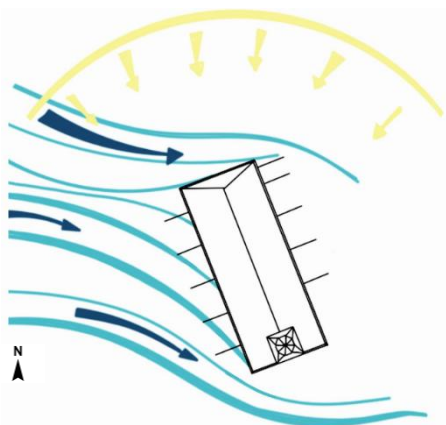


Figura 22. Esquema vientos dominantes sobre la Iglesia de Ichuac. La orientación determina la exposición diferenciada de cada fachada al sol, el viento y la lluvia. Elaboración propia, esquema

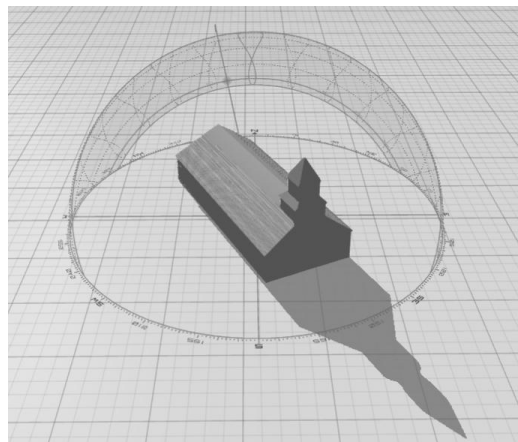


Figura 23. Estudio de asoleamiento de la Iglesia de Ichuac según la latitud del emplazamiento. Elaboración propia con 3D Sun-Path (Andrew Marsh).

Técnica constructiva

La Iglesia de Ichuac responde a la tipología de la Escuela Chilota, organizada en dos volúmenes, un cuerpo horizontal de planta basilical y la torre fachada. La planta se resuelve en tres naves separadas por pilares, con la nave central abovedada por un cañón corrido y dos naves laterales de menor tamaño (UNESCO, 2000; Berg Costa, 2015).

Constructivamente se resuelve mediante el sistema de carpintería de armar, un entramado pesado de piezas de gran sección, de tipo post and beam, unido con ensambles y empalmes de la misma madera, casi sin clavos ni conectores metálicos en la estructura principal. La nave y la torre se conciben como estructuras independientes, lo que otorga al conjunto un comportamiento flexible frente a los sismos y los fuertes vientos del archipiélago.

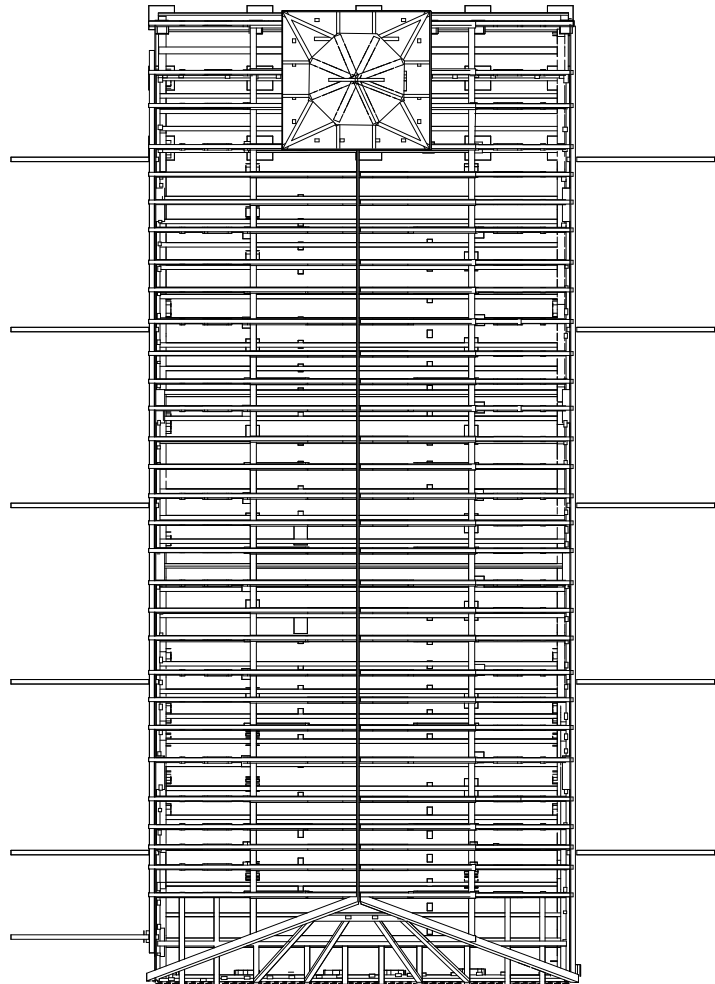


Figura 24. Planta, envigado y cercha. Escala 1:250.
Elaboración propia, Rhino 8.

Sistema de uniones

Las piezas se vinculan íntegramente en madera mediante dos tipos de uniones. Los ensambles unen piezas en ángulo, como la caja y espiga entre pilar y solera, y los empalmes las unen en su longitud, como el rayo de Júpiter, que resiste la tracción. En el arranque, el ensamble a media madera transmite la carga hacia la basa de piedra. Este sistema hace la estructura desmontable y reparable, y permite reemplazar una pieza sin alterar el conjunto (Berg Costa, 2015; Fundación Iglesias Patrimoniales de Chiloé, s.f.).

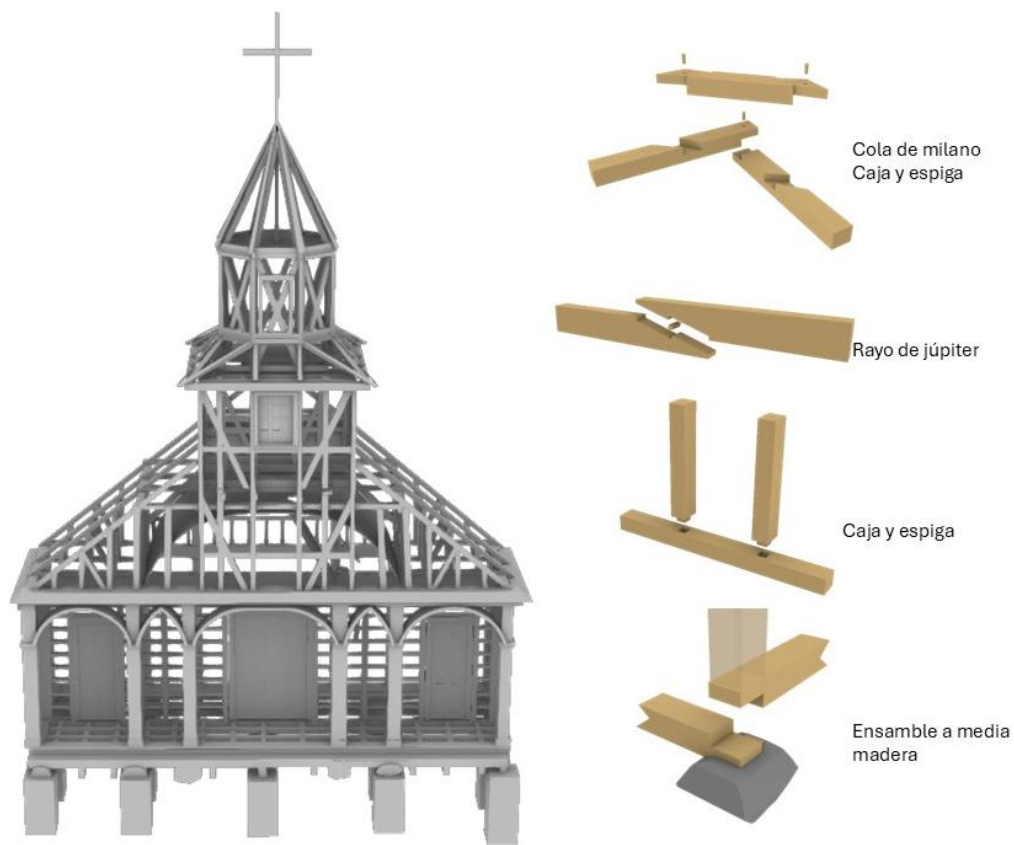


Figura 25. Ejemplos de las uniones características de la carpintería chilota. Elaboración propia en Rhino 8.

Espacios y elementos arquitectónicos

Torre fachada, altura máxima 18,89 m

Chapitel, altura 16,28 m

Solera superior primera
caña, altura 13,09 m

Campanario

Pilar

Cercha

Entramado muro

Fundaciones
de Piedra

Largo 31,9 m

Envigado
de piso

Puntales de
madera

Fundaciones de hormigón aislado

Ancho 13,1 m

Figura 26. Estructura Iglesia Natividad de María de Ichuac. Fuente: Elaboración propia, Rhino 8.

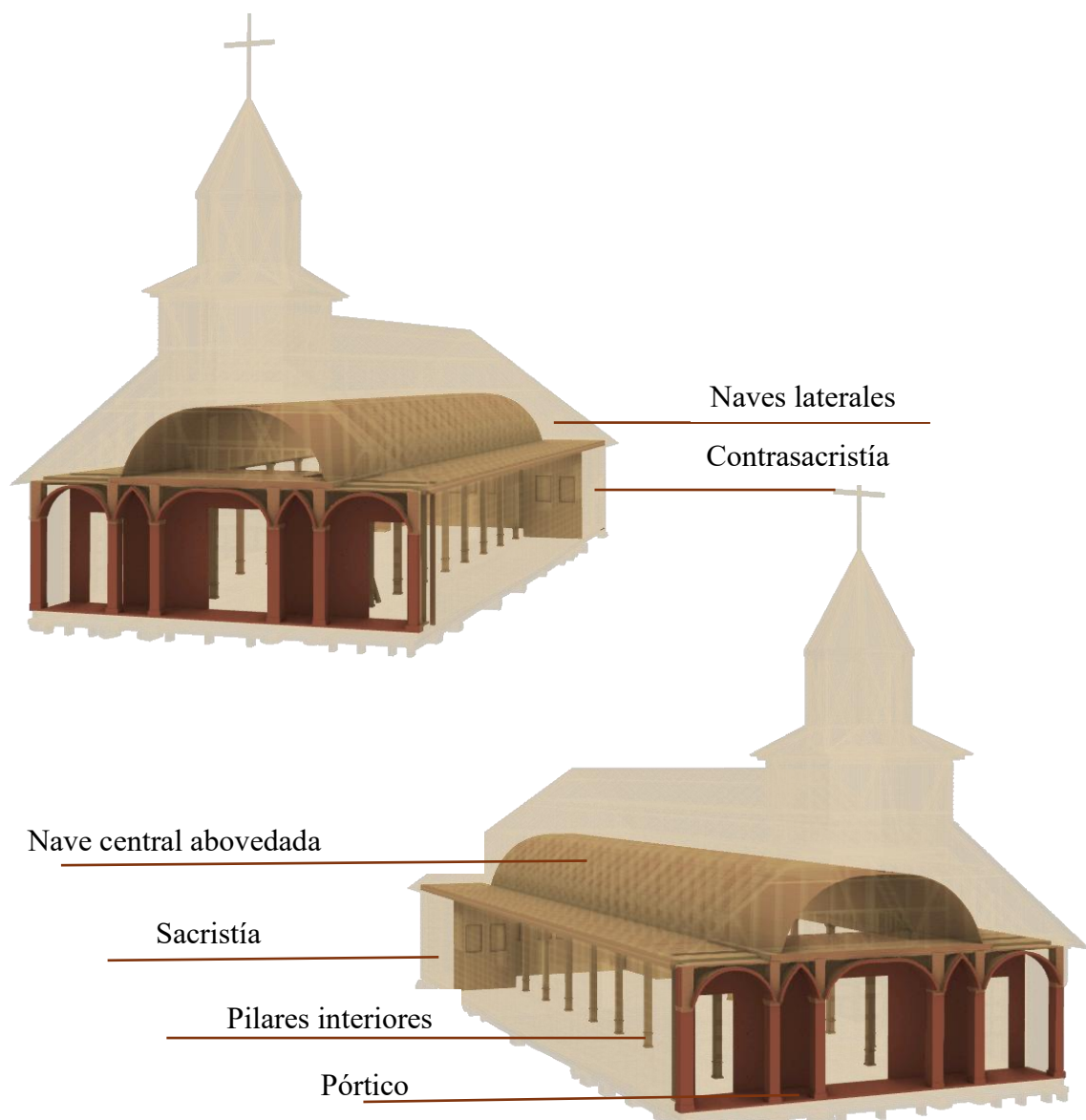


Figura 27. Interior Iglesia Natividad de María de Ichuac. vista suroeste y sureste. Fuente: Elaboración propia, Rhino 8.

Intervenciones

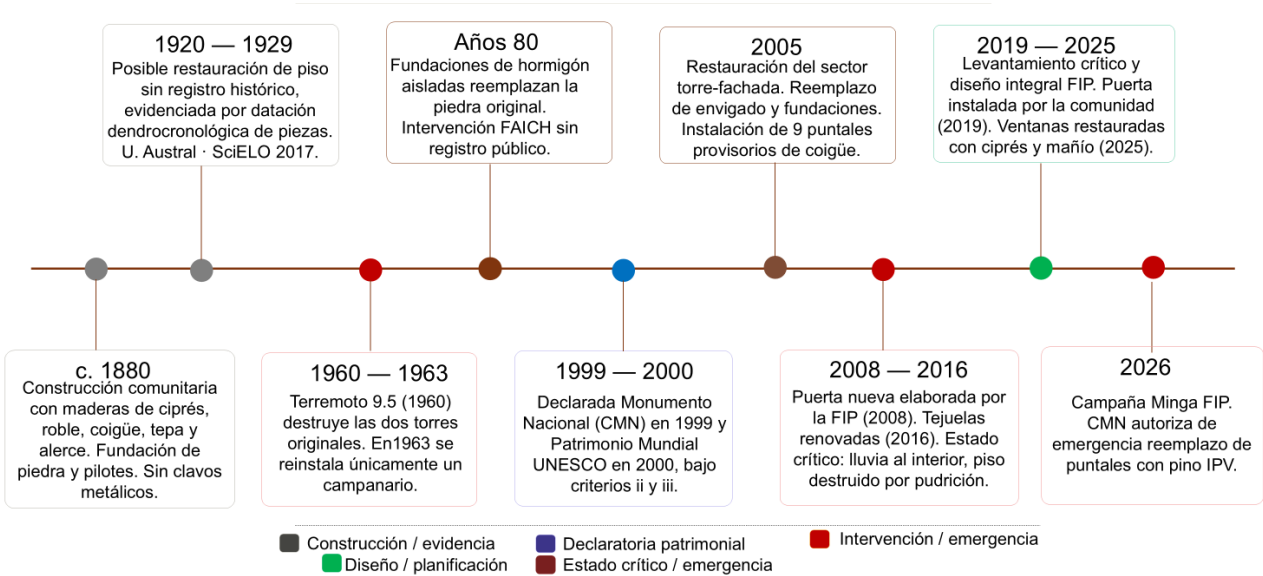
Las sucesivas pérdidas materiales e intervenciones históricas han transformado la iglesia, configurando el estado en que se conserva en la actualidad. El terremoto de 1960 dañó gravemente las dos torres originales y solo uno de los campanarios fue reinstalado, en 1963, de modo que la volumetría que hoy se observa no es la que levantó la comunidad fundadora. Durante la década de 1980 se incorporaron fundaciones de hormigón aisladas bajo los pilares, sustitución que alteró el comportamiento higrotérmico del encuentro entre el edificio y el suelo, y de la cual permanece como testimonio la piedra fundacional original. En 2005, durante la restauración de la torre fachada, se reemplazó el envigado de piso, se incorporaron nuevas fundaciones y se instalaron nueve puntales de coigüe como refuerzo provisorio destinado a asegurar la integridad estructural del área de las naves, que no fue intervenida.

Las campañas siguientes fueron parciales y acotadas. Cielos de naves laterales en 2013, tejuelas de cubierta en 2016, una puerta elaborada en los talleres de la Fundación en 2008 e instalada por la comunidad en 2019, y la restauración de ventanas a inicios de 2025, en la que las piezas faltantes se elaboraron en ciprés de las Guaitecas con refuerzo estructural de maño en dinteles y antepechos. A ellas se suma el reemplazo, por parte de la propia comunidad, del machihembrado de la cara norte por tejuelas de alerce, intervención que modificó la envolvente original de ese paramento.



Figura 28. Faena de reposición de piezas deterioradas del cielo en el interior de la Iglesia Natividad de María de Ichuac. Fotografía de la autora, 11 de noviembre de 2025.

Intervenciones Iglesia Natividad de María de Ichuac



FAICH: Fundación Amigos de las Iglesias de Chiloé · **FIP:** Fundación Iglesias Patrimoniales de Chiloé
· **CMN:** Consejo de Monumentos Nacionales · **Dendrocronología:** Datación de madera por anillos de crecimiento
· **IPV:** Madera industrial impregnada con preservante químico (CCA)

Figura 29. Intervenciones Iglesia Natividad de María de Ichuac. Elaboración propia.

Los puntales como caso crítico

Los dos últimos casos resultan particularmente ilustrativos, pues muestran que la reposición con especies nativas de durabilidad natural sigue siendo practicable en el inmueble cuando la pieza lo permite, y que la propia comunidad la ha ejecutado. Los puntales, en cambio, siguieron el camino contrario. El sistema provisorio de 2005 permaneció más de veinte años en servicio, y en abril de 2026 el Consejo de Monumentos Nacionales, a petición de la Fundación Iglesias Patrimoniales de Chiloé, autorizó su reemplazo de emergencia por piezas de pino radiata impregnado. El diagnóstico consignado por el propio Consejo describe pérdida de sección por erosión, procesos de pudrición, colonización biológica, fendas y fisuras, atribuidos a la exposición prolongada a la radiación solar, la precipitación y el viento. Ese diagnóstico documenta, sobre el propio caso de estudio, el proceso de biodeterioro que esta investigación busca prevenir, en las condiciones de exposición del archipiélago.

El levantamiento de la Fundación (FIP) aporta, una precisión sobre la naturaleza de ese deterioro: consigna en los puntales la presencia de pudrición cúbica y hongos cromógenos, junto con líquen y fendas. La pudrición cúbica corresponde a la manifestación característica de la pudrición parda, en la cual el hongo degrada preferentemente la celulosa y deja un residuo de lignina que se fractura en volúmenes prismáticos.



Figura 30. Deterioro en la zona basal de miembros expuestos. (a) Pieza en contacto directo con el terreno, con colonización biológica, musgo y líquenes. (b) Tinglado con erosión sobre tramo basal degradado. Fotografías de la autora, noviembre de 2025.

Las especies y la lógica constructiva

La identificación de las especies se realizó mediante la triangulación de fuentes documentales, testimoniales y de observación directa. Se consultaron el levantamiento planimétrico y las fichas de la Fundación Iglesias Patrimoniales de Chiloé (FIP), que consignan la materialidad documentada del inmueble, y se contrastaron con el testimonio de actores con conocimiento experto del edificio y del oficio. José Luis Catalán, presidente de la Asociación de Carpinteros Patrimoniales de Chiloé, y encargados del equipo técnico de la FIP. A ello se sumó la observación macroscópica en terreno, atendiendo a características como color, veta, textura y grado de deterioro. La identificación tiene, por tanto, un carácter macroscópico, documental y testimonial, no anatómico de laboratorio, lo que se declara una limitación del alcance.

Sobre esa base se constató mañío en el revestimiento de la fachada sur, ciprés de las Guaitecas en las caras oriente y poniente y en puertas y marcos, alerce en las tejuelas de la cara norte, coigüe en pilares y elementos estructurales, y tepa en el revestimiento interior de muro. El registro difiere parcialmente entre las fuentes, diferencia atribuible a que cada una consigna un momento distinto del inmueble: el alerce de la cara norte, por ejemplo, corresponde a un reemplazo posterior y no al material original.

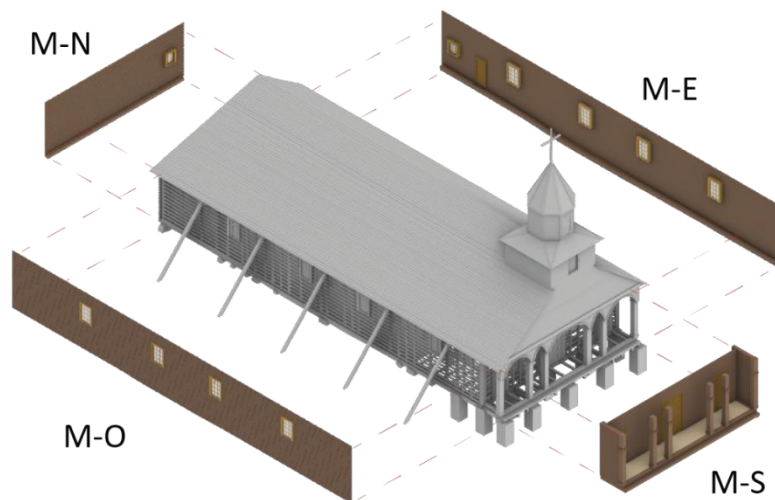


Figura 31. Distribución de puntos de muestreo fúngico por orientación y tipo de miembro. Elaboración propia.

Tabla 10. Especies muestreadas por orientación en la envolvente exterior, con su densidad de referencia (INFOR). Fuente: elaboración propia.

Código	Ubicación	Especie	Nombre científico	Densidad valores del INFOR
M-S	Fachada principal, sur	Mañío	<i>Podocarpus nubigenus</i>	463 kg/m ³
M-N	Culata norte, parte trasera	Alerce	<i>Fitzroya cupressoides</i>	444 kg/m ³
M-O	Lateral oeste, hacia el mar (poniente)	Ciprés de las Guaitecas	<i>Pilgerodendron uviferum</i>	430 a 470 kg/m ³
M-E	Lateral este, (oriente)	Ciprés de las Guaitecas	<i>Pilgerodendron uviferum</i>	430 a 470 kg/m ³

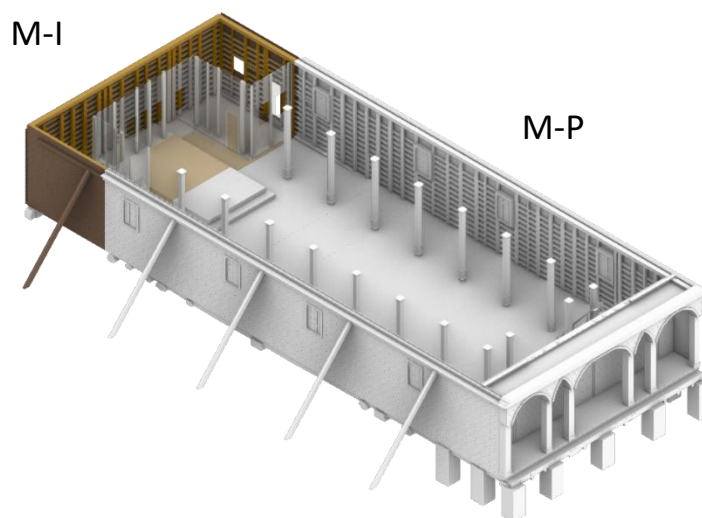


Figura 32. Interior, zona de sacristía y contrasacristía. Punto de muestreo M-I y general M-P. Elaboración propia.

Tabla 11. Especies muestreadas en el interior y en elementos estructurales, con su densidad de referencia (INFOR). Fuente: elaboración propia.

Código	Ubicación	Especie	Nombre científico	Densidad valores del INFOR
M-I	Interior,	Tepa	<i>Laureliopsis philippiana</i>	494 kg/m ³ .
M-P	Piso, pilares y soleras	Coigüe	<i>Nothofagus dombeyi</i>	604 kg/m ³ .

El conocimiento tradicional del oficio

Entrevista

El testimonio de José Luis Catalán, presidente de la Asociación de Carpinteros Patrimoniales de Chiloé, permitió reconstruir los criterios tradicionales de selección y preparación de la madera. Según relata, se prefería talar árboles de madera dura y edad avanzada, mayores de 30 años, a los que se atribuía una mejor defensa frente a hongos e insectos, procurando que el árbol no tuviese savia activa, pues la madera con savia resulta inestable y menos durable. De acuerdo con su testimonio, ese momento se determinaba por la fase lunar decreciente y por los meses sin erre. También señala que algunas maderas se dejaban sumergidas en el mar durante un tiempo, práctica a la que la tradición atribuía un aumento de la durabilidad.

Cabe precisar que la asociación entre fase lunar y propiedades de la madera, conocida internacionalmente como madera de luna, carece de respaldo experimental consistente: un estudio reciente basado en dos millones de registros dendrométricos no encontró oscilaciones lunares en el crecimiento del tronco, que se acopla en cambio a la temperatura y la humedad ambiental (Tumajer et al., 2023). No obstante, cabe observar que el período de tala señalado por la tradición, los meses sin erre, corresponde al invierno austral, estación de menor actividad vegetativa en que el contenido de savia es efectivamente menor, lo que sugiere que el efecto atribuido a la fase lunar podría explicarse por la estacionalidad de la tala más que por el ciclo lunar en sí. Algo similar ocurre con la inmersión en agua de mar, a la que puede atribuirse un efecto de lavado de savias y azúcares que reduciría el atractivo de la madera para hongos e insectos. A los efectos de esta investigación, lo relevante no es la validez técnica de cada creencia, sino constatar que la Escuela Chilota de Arquitectura Religiosa en Madera operaba con una estrategia de durabilidad basada en la selección de la especie, el momento de la tala y el emplazamiento de cada elemento, y no en la aplicación de productos químicos.

Esa estrategia se verifica en la distribución material del inmueble. Según Catalán, para los elementos estructurales se seleccionaron coigüe, tino y luma, esta última la más empleada, valoradas por su robustez y resistencia, mientras que la tepa se reservó para posiciones interiores por su menor calidad y peor comportamiento frente a la humedad. Las puertas y marcos se elaboraron en ciprés de las

Guaitecas. Conviene distinguir aquí entre robustez mecánica y durabilidad biológica, ya que el coigüe se emplea por su capacidad estructural, pero al ser una especie de baja durabilidad natural, la tradición lo dispone protegido del contacto directo con la intemperie. La misma lógica explica que la tepa colocada en los pilares del pórtico haya soportado en el tiempo, al no tener contacto directo con el agua. La durabilidad se resolvía, por tanto, asignando a cada especie la posición compatible con su comportamiento frente al agua.

Catalán advierte, además, sobre una práctica reciente que contraviene esta lógica, que es la incorporación de maderas de reposición no adaptadas a la zona y dispuestas de manera provisoria, las cuales, al deteriorarse rápidamente, terminan afectando también a las piezas originales contiguas. A ello se suma el uso de madera joven, de árboles menores de 30 años, más propensa a fallar por su menor durabilidad.

Finalmente, el testimonio aporta un diagnóstico de las causas del deterioro observado. Catalán identifica la cara norte y, en segundo lugar, el poniente como los sectores más afectados, por recibir mayor carga de viento y lluvia. Señala también un progresivo hundimiento de las fundaciones de piedra, agravado por el peso de las grandes congregaciones durante las fiestas patronales y por la manipulación reiterada de la



Figura 33. Esquema de orientación cardinal de la Iglesia de Ichuac. Fuente: Elaboración propia.

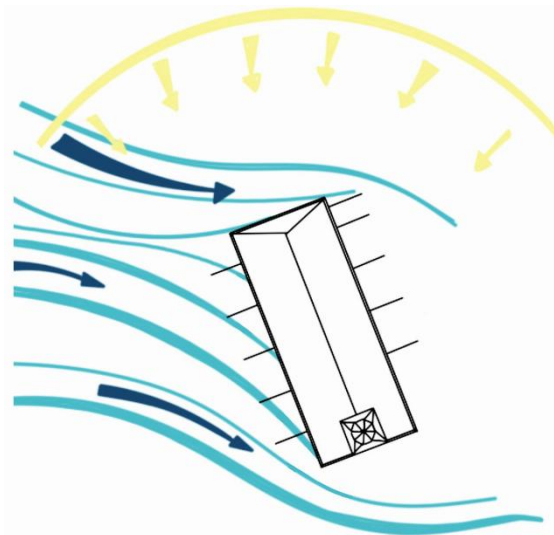


Figura 34. Esquema de asoleamiento y vientos dominantes en la Iglesia de Ichuac. Elaboración propia.

estructura en esas ocasiones. Respecto de la cubierta, indica que su daño provenía de perforaciones puntuales por las que se filtraba el agua. Estas apreciaciones del oficio coinciden con la distribución del deterioro registrada en terreno por esta investigación, lo que refuerza la convergencia entre el saber tradicional y la verificación material.

Regímenes de terminación superficial

El levantamiento permitió además distinguir dos regímenes de terminación dentro del propio inmueble. El revestimiento interior de las naves y los pilares de la columnata presentan terminación pintada, mientras que el cielo de la bóveda, la estructura de entretecho y los recintos anexos, sacristía y contrasacristía, mantienen la madera al natural, sin recubrimiento. Esta distinción, registrada por observación directa e identificada sobre planimetría, es relevante para el alcance del tratamiento propuesto, que penetra por capilaridad y requiere un sustrato poroso: su aplicación es viable únicamente sobre madera desnuda, no sobre superficies ya pintadas o selladas.



Figura 35. Interior contrasacristía. Madera al natural sin recubrimiento. Fotografía de la autora, noviembre 2025.



Figura 36. Interior nave oeste. Madera al natural sin recubrimiento. Fotografía de la autora, noviembre 2025.

Selección de miembros críticos

Para la selección de los miembros críticos se priorizaron aquellos que reúnen simultáneamente exposición directa a la intemperie, proximidad o contacto con el suelo y ausencia de recubrimiento, condiciones que corresponden a las clases de mayor riesgo según NCh819 y que, en consecuencia, presentan mayor probabilidad de colonización fúngica. Los puntales de coigüe incorporados en 2005 constituyen el caso más representativo, al tratarse de elementos de reposición expuestos, en contacto con el suelo y sin recubrimiento. A ellos se suma, como campo de aplicación futuro, toda pieza de reposición que se incorpore en posiciones expuestas, donde el tratamiento podría aplicarse sobre la madera nueva antes de su puesta en servicio.



Figura 37. Interior. Madera expuesta sin recubrimiento. Fotografía de la autora, noviembre 2025.



Figura 38. Revestimiento exterior de tejuelas con deterioro superficial visible. Fotografía de la autora, noviembre 2025.

Tabla 12. Clasificación de los elementos de madera de la Iglesia Natividad de María de Ichuac según especie, durabilidad natural (NCh789/1) y clase de riesgo de uso (NCh819). Elaboración propia.

Elemento	Especie	Durabilidad natural (NCh789/1)	Ubicación y exposición	Clase de riesgo (NCh819)	Prioridad de muestreo
Revestimiento interior de muro	Tepa	No durable (Nº 5)	Interior, seco, sin contacto con suelo	R1	Descartado (pintado, bajo riesgo)
Cielo de bóveda y entretecho	Mañío (inferido según patrón tipológico, sin verificación anatómica)	Poco durable (Nº 4)	Interior, ventilación variable	R1 a R2	Baja
Pilares interiores de la columnata	Coigüe	Moderadamente durable (Nº 3)	Interior, sobre nivel del suelo	R2	Descartado (pintado)
Tejuelas de cubierta y fachadas	Alerce (norte), ciprés de las Guaitecas (oriente y poniente)	Alerce muy durable (Nº 1); ciprés muy durable	Exterior, expuesto a la intemperie	R3	Media (durables, pero expuestas)
Revestimiento de fachada sur, bajo el pórtico	Mañío (intervención posterior a la reconstrucción de la torre)	Poco durable (Nº 4)	Exterior protegido bajo pórtico, sin exposición directa a lluvia	R2 a R3	Media
Puertas y marcos	Ciprés de las Guaitecas	Muy durable	Exterior, expuesto	R3	Alta
Soleras inferiores y base de pilares	Coigüe	Moderadamente durable (Nº 3)	Próximo al suelo, humedad ascendente	R4	Media
Puntales de reposición (2005)	Coigüe	Moderadamente durable (Nº 3)	Exterior, contacto con suelo	R4 a R5	Alta (caso más representativo)

Etapas 2. Muestreo fúngico

Se buscó obtener, desde el propio monumento, los organismos frente a los cuales se ensayaría el biocida. Esta condición distingue a la investigación de los antecedentes revisados en el estado del arte, que trabajan con cepas de colección, es decir con organismos provenientes de bancos de referencia, y no con las presentes en el bien que se pretende proteger.

Criterio de selección de los puntos

La selección de los puntos de muestreo consideró dos condiciones, una exposición prolongada a la intemperie y la presencia de signos visibles de deterioro biológico. Se descartaron, en consecuencia, los sectores intervenidos recientemente, en particular los marcos de ventana repuestos a inicios de 2025, cuya madera no ha estado expuesta el tiempo necesario para desarrollar colonización. Se incluyeron, en cambio, sectores correspondientes a reposiciones antiguas, cuya permanencia prolongada permite observar el comportamiento de la madera frente a las condiciones ambientales del archipiélago.

La identificación de los sectores con colonización fúngica se realizó según los signos descritos en la literatura: decoloración, manchas oscuras, textura esponjosa y pérdida de cohesión. Se descartaron los sectores con presencia predominante de liquen, por no corresponder a organismos xilófagos y no aportar información sobre degradación de la madera.

Distribución del muestreo

El muestreo se organizó según las cuatro orientaciones principales del templo, esto es norte en la cara trasera, sur en la fachada principal, y oriente y poniente en las caras laterales. En cada orientación se extrajeron cuatro muestras: dos laterales, una central y una de control en madera sin daño aparente.

Se realizaron además extracciones complementarias en puntos específicos de la estructura, comprendiendo el interior del templo, sobre envigado de piso expuesto por el levantamiento del entablado, pilares y revestimiento de muro, y el exterior, sobre uno de los puntales y sobre las puertas

principal y lateral. Estas últimas se dirigieron a sectores de alta exposición a humedad y radiación solar.

Todas las muestras se extrajeron mediante raspado con espátula, se codificaron según orientación, ubicación y condición superficial, y se almacenaron en recipientes estériles preservando, esto es el registro documentado del traslado y manipulación de cada muestra, hasta su análisis en laboratorio.

Extracción Muestra Cara Sur (M-S)

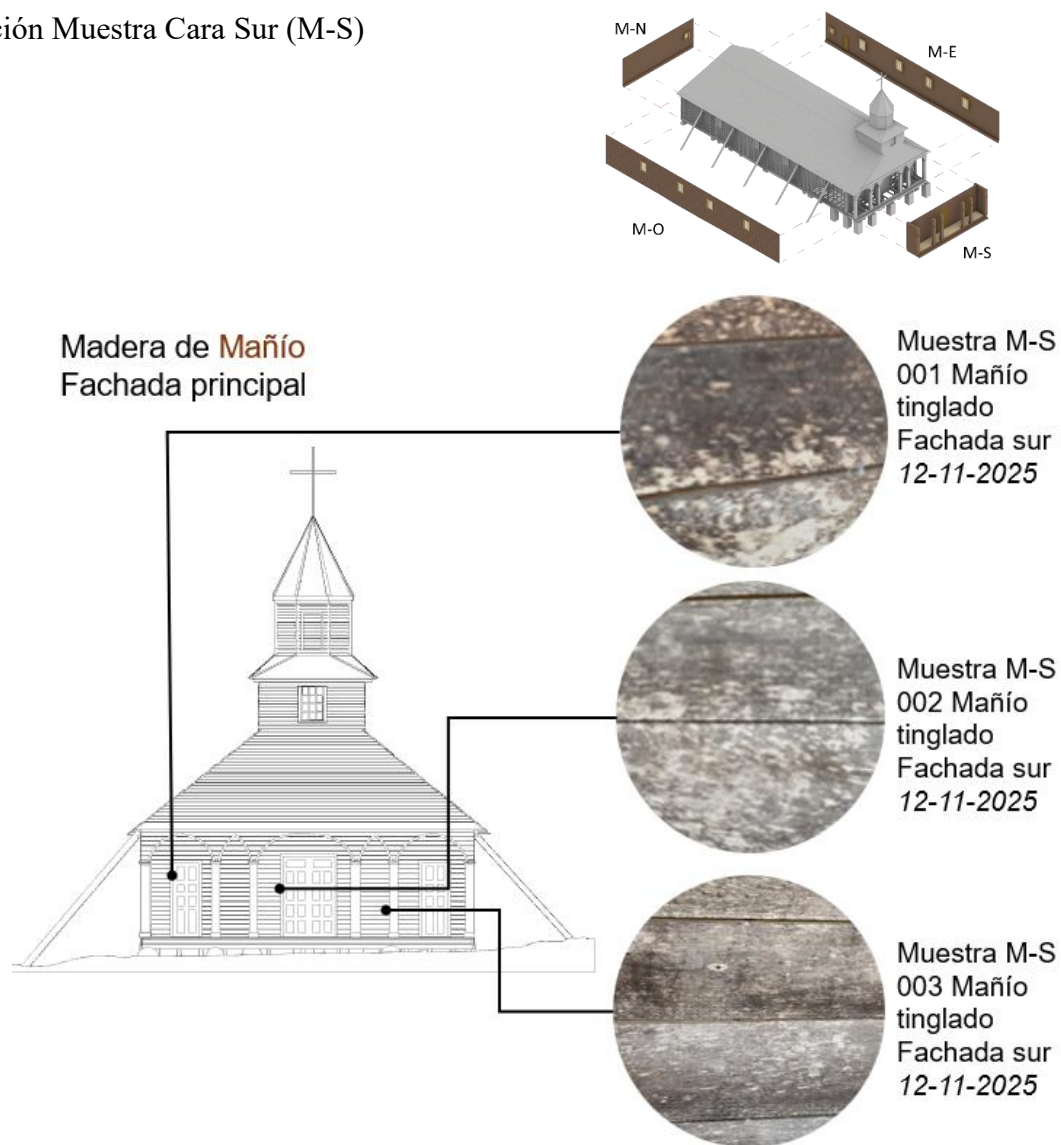
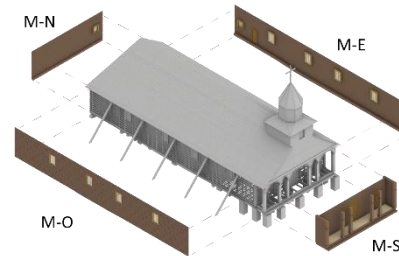
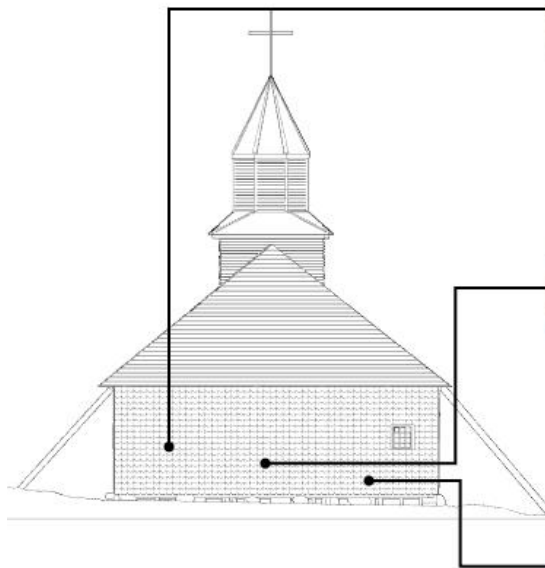


Figura 39. Extracción de muestras de la cara sur (M-S), madera de mañío. Elaboración propia.

Extracción Muestra Cara Norte (M-N)



Madera de **Alerce**
Tejuelas
reemplazadas 2005



Muestra M-N
004 Alerce
Tejuelas
Fachada norte
12-11-2025



Muestra M-N
005 Alerce
Tejuelas
Fachada norte
12-11-2025



Muestra M-N
006 Alerce
Tejuelas
Fachada norte
12-11-2025

Figura 40. Extracción de muestras de la cara norte (M-N), madera de alerce. Elaboración propia.

Extracción Muestra Cara Oeste (M-O)

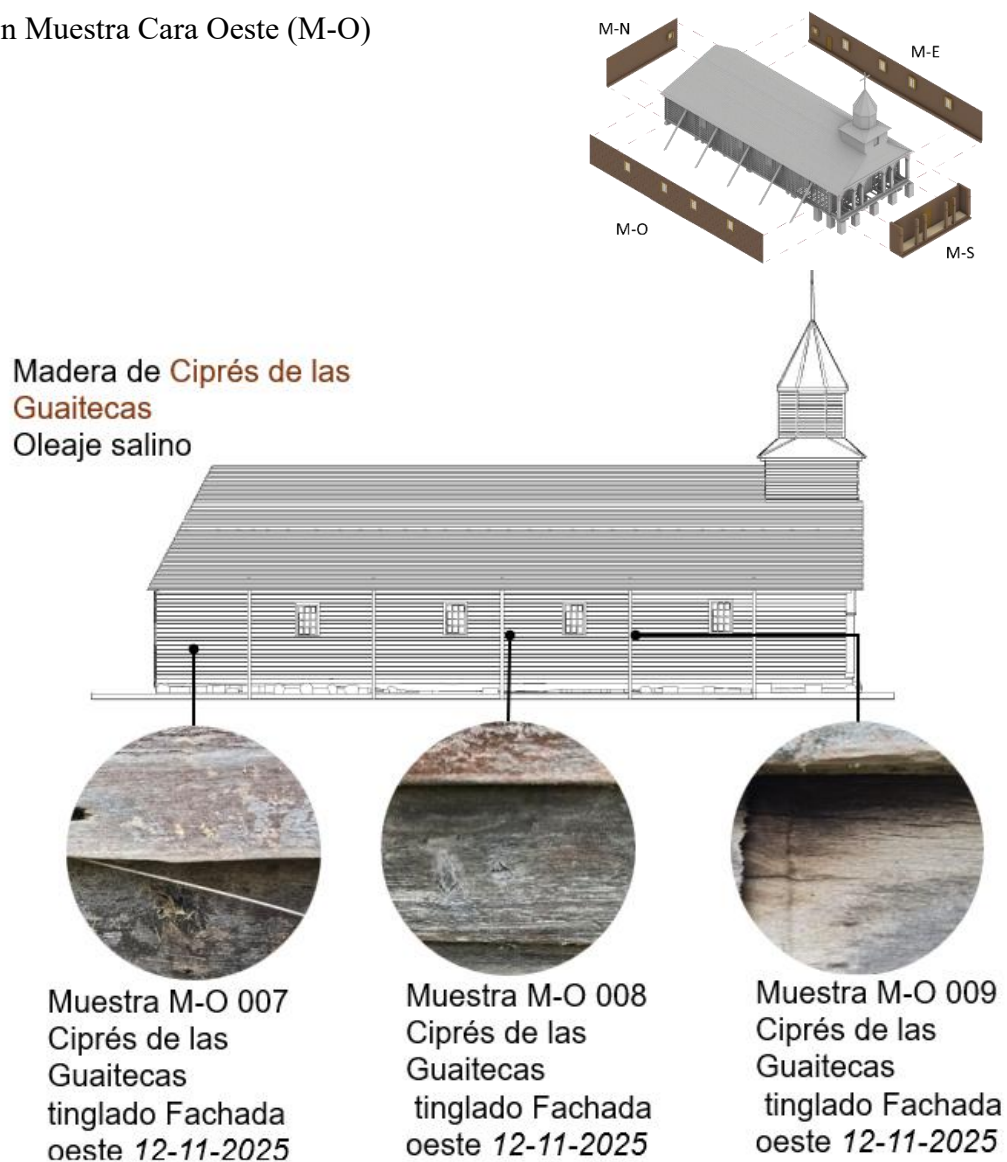


Figura 41. Extracción de muestras de la cara oeste (M-O), madera de ciprés de las Guaitecas. Elaboración propia.

Extracción Muestra Cara Este (M-E)

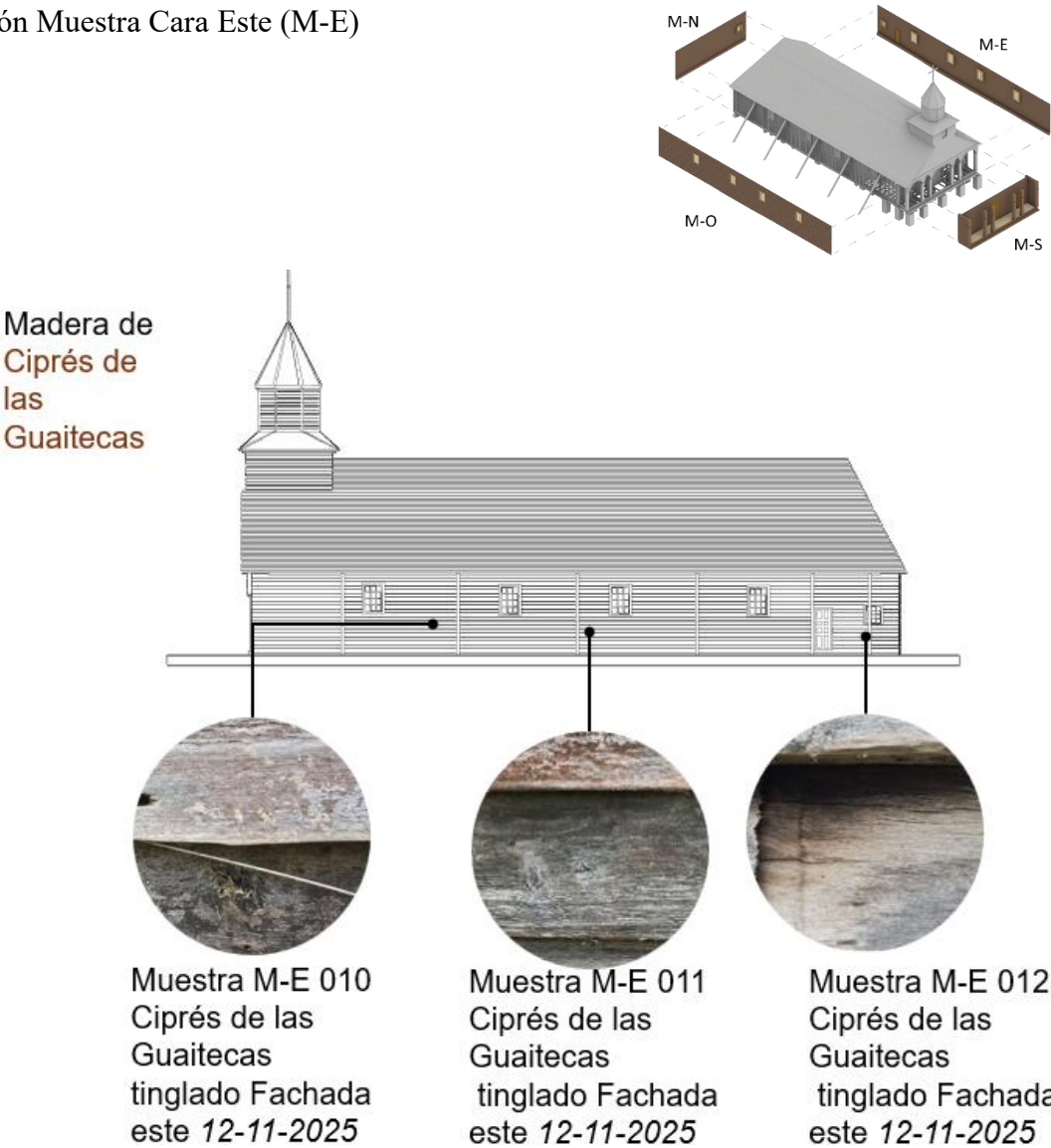


Figura 42. Extracción de muestras de la cara este (M-E), madera de ciprés de las Guaitecas. Elaboración propia.

Extracción Muestras interiores (M-I) y (M-P)

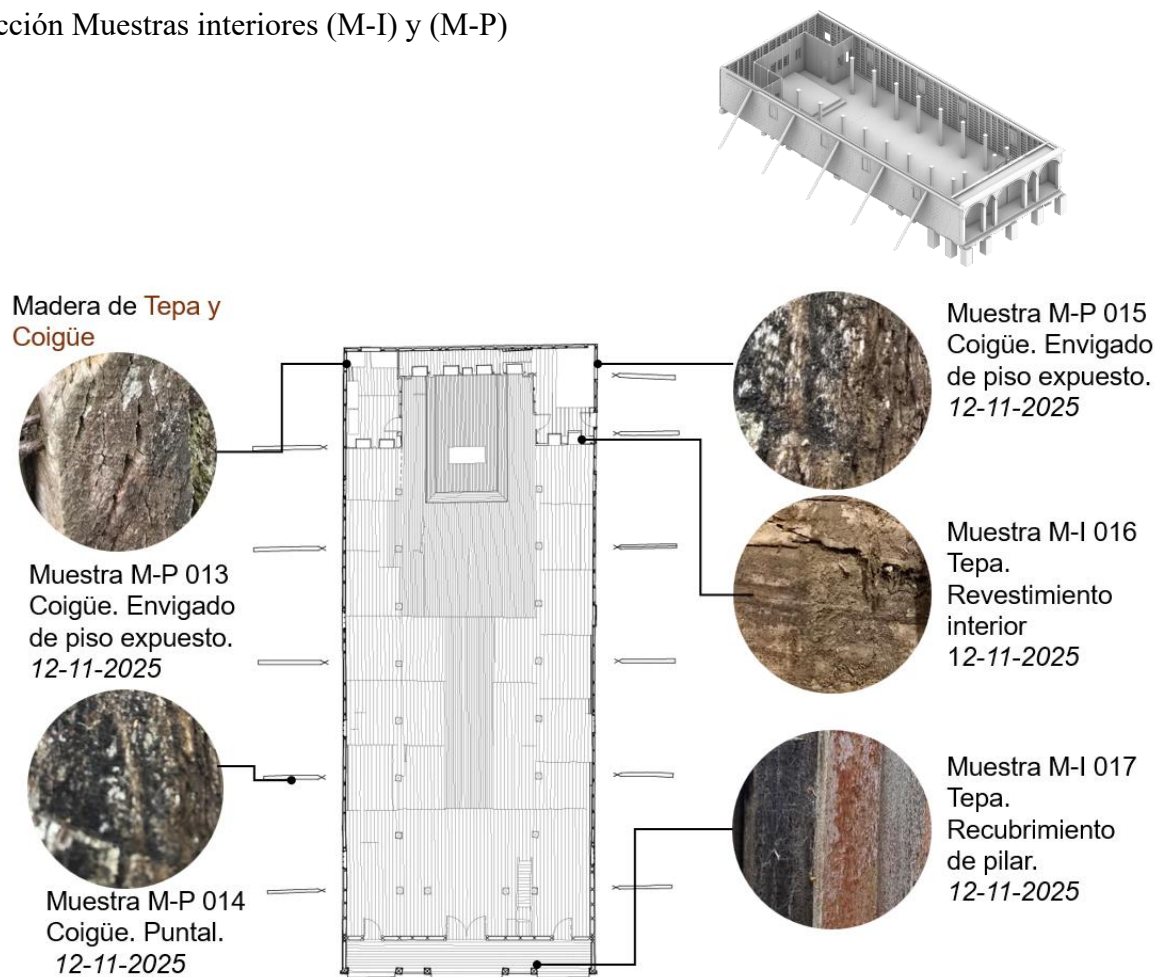


Figura 43. Extracción de muestras del interior (M-I y M-P), madera de tepa y coigüe. Elaboración propia.

Etapa 3. Experimentación

La tercera etapa contrastó el comportamiento de probetas tratadas y no tratadas frente a las tres cepas seleccionadas, con el fin de establecer si el aceite esencial de boldo previene la aparición temprana de crecimiento fúngico. Se entiende por probeta la pieza normalizada de madera preparada para el ensayo, a diferencia de la muestra, que designa el material extraído en terreno.

El ensayo es de tipo exploratorio y de tamizaje, es decir, una evaluación preliminar destinada a detectar diferencias de comportamiento entre tratamientos. Su finalidad es comparativa y no busca establecer valores de eficacia conforme a norma, para lo cual se requeriría la determinación de pérdida de masa según protocolo normalizado.

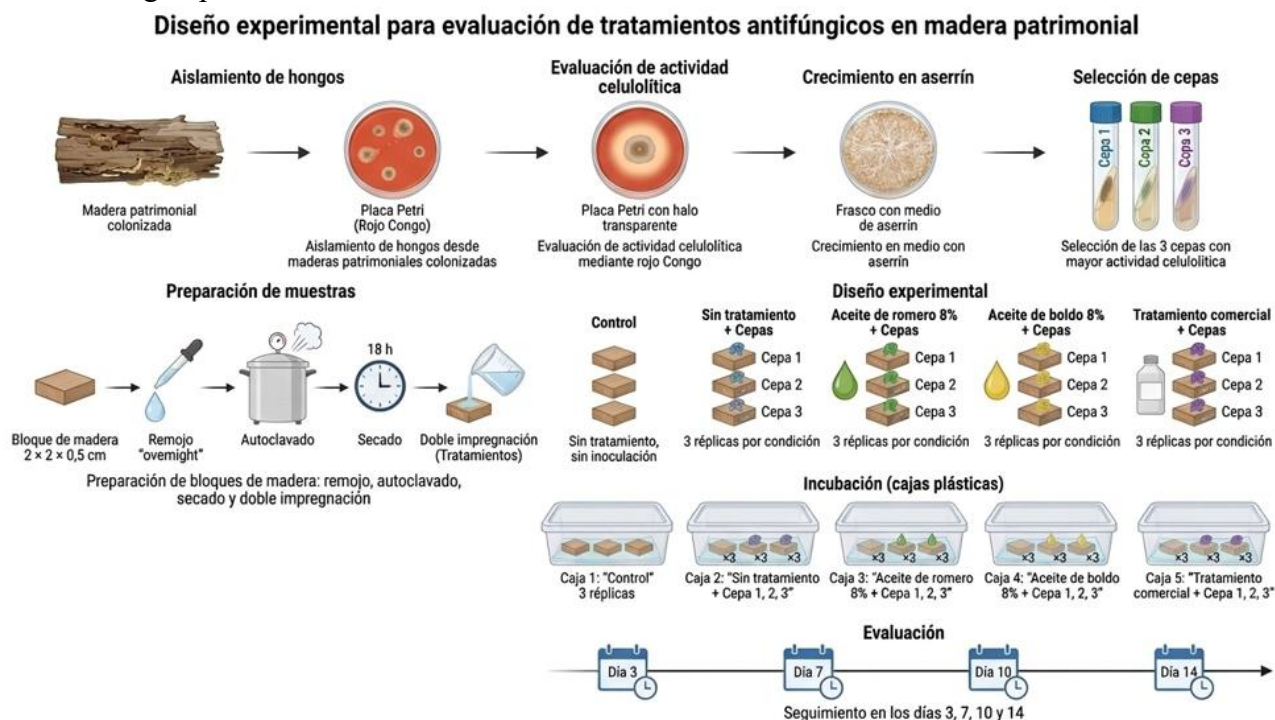


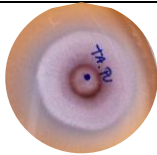
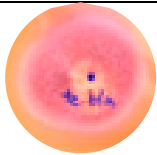
Figura 44. Diagrama del diseño experimental para evaluación. Fuente: informe de laboratorio de C. Murúa (2026). Nota: el informe original consigna romero; se trata de romerillo.

Selección de las cepas

Antes del montaje del ensayo en madera, se evaluó la actividad celulolítica de las cepas aisladas con el fin de seleccionar las que se emplearían como inóculo. La evaluación se realizó de manera visual y cualitativa, considerando el crecimiento de cada cepa sobre la placa y su coloración como indicadores de actividad, dado que las cepas obtenidas son de crecimiento lento y desarrollaron los halos de degradación de forma tardía, con posterioridad a la evaluación inicial. Por esta razón, la actividad no se cuantificó mediante medición del halo, sino que se estimó de forma comparativa entre placas.

Sobre esa base se seleccionaron tres cepas, designadas Cepa 1, Cepa 2 y Cepa 3, que constituyeron el inóculo del ensayo en madera. La Tabla 13 registra las cepas aisladas y su actividad observada.

Tabla 13. Cepas aisladas y evaluación visual de su actividad. Fuente: C. Murúa, informe de laboratorio (2026).

Cepa	Actividad observada (evaluación visual)	Cepa	Actividad observada (evaluación visual)
1 (seleccionada)		4	
2 (seleccionada)		5	
3 (seleccionada)		6	

El registro fotográfico final de las placas no pudo conservarse, dado que las cepas, de crecimiento lento, se mantuvieron en observación hasta el día 45 y presentaron contaminación o desecación. La evaluación de la actividad tuvo, por tanto, carácter cualitativo y preliminar, lo que se declara una limitación del ensayo.

Sustrato y preparación

Como sustrato se emplearon bloques de coigüe (*Nothofagus dombeyi*) de 2 x 2 x 0,5 cm. La especie se seleccionó por corresponder al material de los puntales instalados en 2005, es decir, al elemento que concentra el deterioro en el caso de estudio. Los bloques se sometieron a remojo por una noche, esterilización en autoclave por vapor a presión, secado durante 18 horas y doble impregnación con el tratamiento correspondiente a cada condición.

Diseño experimental

Se dispusieron cinco condiciones, con tres réplicas cada una, ensayadas frente a las tres cepas seleccionadas (Cepa 1, Cepa 2 y Cepa 3). La unidad experimental fue la probeta individual. A cada probeta se aplicó 1 mL de tratamiento. El aceite esencial de boldo se dispuso en emulsión acuosa con Tween 20 (un agente emulsionante de baja toxicidad que permite mezclar de forma homogénea el aceite con el agua), en proporción 2:1 de Tween 20 respecto del aceite, a una concentración del 8 % v/v (ocho partes de aceite por cada 100 de mezcla, medidas en volumen). Las condiciones ensayadas se detallan en la Tabla 14.

Tabla 14. Condiciones ensayadas sobre probetas de coigüe, con tres réplicas por condición. Fuente: elaboración propia.

Condición	Tratamiento	Inóculo	Función
1	Sin tratamiento	Sin inocular	Control de esterilidad
2	Sin tratamiento	Cepas 1, 2 y 3	Control de crecimiento
3	Aceite esencial de romerillo al 8 %	Cepas 1, 2 y 3	Comparador vegetal
4	Aceite esencial de boldo al 8 %	Cepas 1, 2 y 3	Tratamiento propuesto
5	Preservante comercial Cerestain (Ceresita)	Cepas 1, 2 y 3	Comparador comercial

La primera condición operó como control de esterilidad, verificando que no existiera contaminación ajena al ensayo. La segunda, como control de crecimiento, estableciendo el comportamiento del hongo sin tratamiento alguno. La comparación válida del tratamiento propuesto se establece, por tanto, respecto de esta última. El aceite esencial de romerillo al 8 % se incorporó como comparador vegetal y el preservante comercial como comparador industrial.

Incubación y evaluación

Las probetas se incubaron en cajas plásticas, en condiciones controladas de humedad y temperatura, con seguimiento a los días 3, 7, 10 y 14. La evaluación fue visual, mediante registro fotográfico comparativo del desarrollo micelial en superficie, entendiendo por micelio el conjunto de filamentos que forma el cuerpo del hongo. No se determinó pérdida de masa, de modo que la evaluación es de naturaleza cualitativa y comparativa.

Serie complementaria de concentraciones

De manera complementaria, y a diferencia del ensayo en madera, se ejecutó una serie de microdilución en microplacas de 24 pocillos, técnica que permite ensayar simultáneamente varias concentraciones en volúmenes reducidos, sobre agar papa dextrosa (PDA), medio de cultivo estándar para hongos, suplementado con aserrín. Se evaluaron siete condiciones, que corresponden al aceite esencial de boldo al 1, 2, 4, 6 y 8 %, el tratamiento comercial y un control sin aceite, con tres réplicas por condición y controles de esterilidad para cada una de las tres cepas, con seguimiento durante tres días. Esta serie se ejecutó con posterioridad al montaje del ensayo en madera, de modo que la concentración del 8 % empleada en las probetas tuvo carácter tentativo y no derivó de ella. Sus resultados se presentan en el capítulo de resultados.

Limitaciones del diseño

La principal limitación del ensayo reside en el modo de aplicación. El tratamiento se aplicó por doble impregnación en laboratorio, procedimiento que satura la probeta y difiere de la aplicación superficial con brocha que contempla el protocolo. La impregnación puede producir una retención de aceite muy superior a la de la brocha, por lo que los resultados no pueden trasladarse directamente al modo de aplicación propuesto. En consecuencia, la aplicación *in situ* con brocha se plantea como propuesta y no como resultado validado, de modo que su verificación, junto con la medición de la retención, la penetración y la permanencia por esa vía, queda como trabajo futuro.

Asimismo, la evaluación fue visual y cualitativa, sin cuantificación de la actividad ni determinación de pérdida de masa. La ventana de observación de 14 días es acotada, por lo que la ausencia de crecimiento visible no permite descartar actividad incipiente en el interior de la probeta.

Etapa 4. Protocolo

El protocolo se formula como un método de estructura general, aplicable a las piezas nuevas de reposición de las iglesias de la Escuela chilota, y se demuestra sobre el caso de Ichuac. Su forma de trabajo, verificar la madera, aplicar el tratamiento, ordenar el edificio según su exposición y mantenerlo con la comunidad, es trasladable a otros templos. Los datos particulares, como la identificación de las caras más expuestas, se obtienen para cada iglesia según su orientación, y en Ichuac corresponden a las caras norte y poniente.

La formulación se apoyó en tres insumos. Del levantamiento de la primera etapa provienen la identificación de los miembros críticos y la orientación de cada fachada. Del ensayo de la tercera etapa proviene la selección del principio activo. La concentración empleada, del 8 %, tiene carácter exploratorio, adoptada como punto de partida a la espera de su determinación definitiva. Del marco de referencia provienen las exigencias normativas que la propuesta debe satisfacer. El protocolo se estructura en dos instrumentos y un procedimiento de aplicación.

Zonificación por exposición

El primer instrumento ordena el edificio según su grado de exposición. Toma la orientación de cada fachada como variable, atendiendo a que la evaporación y el lavado del aceite por la lluvia dependen



Figura 45. Criterio de superficies aptas establecido en terreno. Dos fotografías enfrentadas, (a) revestimiento de muro y pilares de la columnata con terminación pintada, no aptos, y (b) bóveda de cielo y estructura de entretecho con madera al natural, aptos. Fotografía de la autora, noviembre de 2025.

de la humedad, la radiación y la incidencia del viento. La zonificación se apoya en el registro de orientaciones de la primera etapa y en la coincidencia, entre el registro de terreno y el testimonio del oficio, respecto de que las caras norte y poniente concentran la mayor exposición. La frecuencia de reaplicación no se fija en un calendario, sino que se plantea según la inspección del estado del tratamiento, priorizando las caras más expuestas. Su ajuste en el tiempo queda como trabajo futuro.

Tabla 15. Zonificación por exposición según orientación. Fuente: elaboración propia.

Orientación	Condición de exposición	Prioridad de inspección
Norte (culata trasera)	Alta. Mayor incidencia de viento y lluvia	Alta
Oeste (lateral poniente)	Alta. Segunda cara más expuesta	Alta
Este (lateral oriente)	Media. Exposición intermedia	Media
Sur (fachada principal, bajo pórtico)	Media. Protegida parcialmente por el pórtico	Media
Interior y recintos anexos	Baja. Sin exposición directa	Baja

Nota. La prioridad de inspección ordena los sectores según su exposición. La frecuencia de reaplicación se determina por inspección del estado del tratamiento y no por un calendario fijo.

Régimen de mantención comunitaria

El segundo instrumento establece quién ejecuta la aplicación y bajo qué modalidad. Al no requerir infraestructura industrial ni traslado de piezas a planta, el protocolo admite ejecución por la propia comunidad, en continuidad con la tradición de trabajo colectivo reconocida en la inscripción del Sitio y con la práctica documentada en el inmueble, donde la comunidad ha ejecutado reposiciones en años recientes.

Procedimiento de aplicación

El procedimiento se ejecuta en seis pasos. Primero, diagnóstico de la pieza, verificando que se trate de madera sana, desnuda y porosa, y no de un elemento con deterioro establecido, dado que el tratamiento es preventivo y no curativo. Segundo, verificación de que la superficie esté seca, condición necesaria para que el aceite penetre. Tercero, limpieza superficial, retirando polvo y organismos adheridos. Cuarto, aplicación del aceite mediante brocha, en dos manos sucesivas. Quinto, registro de la intervención, consignando la pieza, la fecha y la superficie tratada. Sexto, reaplicación posterior según la inspección del estado, priorizando las orientaciones más expuestas. Las especificaciones se resumen en la Tabla 16.

Tabla 16. Especificaciones del tratamiento propuesto. Fuente: elaboración propia.

Parámetro	Especificación
Principio activo	Aceite esencial de boldo (<i>Peumus boldus</i>)
Concentración	8 % v/v, exploratoria
Vehículo	Emulsión acuosa con Tween 20 (proporción Tween 20: aceite 2:1)
Modo de aplicación propuesto	Brocha, dos manos sucesivas
Sustrato	Madera sana, desnuda y porosa
Condición de aplicación	Superficie seca
Alcance	Preventivo, no curativo
Frecuencia	Según inspección del estado, priorizando caras más expuestas
Ejecución	Comunitaria, sin infraestructura industrial
Autorización requerida	CMN, conforme a la Ley N°17.288

Nota. La concentración y el modo de aplicación tienen carácter preliminar.

Procedimiento de evaluación

Formulado el protocolo, se sometió a evaluación de conformidad mediante contraste con las exigencias de ambos marcos normativos, comparando la propuesta con el CCA, preservante que hoy exige el marco constructivo para la madera de reposición. Del marco constructivo se verifican la protección de las piezas de reposición de menor durabilidad natural, la inclusión del preservante entre los autorizados por la NCh790 y la autorización vigente del Servicio Agrícola y Ganadero (SAG). De los principios patrimoniales se verifican la mínima intervención, la compatibilidad de materiales, el carácter no permanente y renovable del tratamiento, la aplicación en el propio inmueble y la no alteración del aspecto superficial. El procedimiento permite establecer si la propuesta satisface simultáneamente requisitos que hoy ningún tratamiento disponible cumple a la vez. Sus resultados se presentan en el capítulo siguiente.

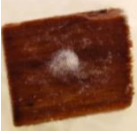
RESULTADOS Y EVALUACIÓN DEL PROTOTIPO

1. Resultados del ensayo experimental

El ensayo evaluó cinco condiciones frente a tres cepas fúngicas, es decir, tres tipos de hongo aislados de la propia iglesia, con tres réplicas por condición, o sea, tres probetas iguales para cada caso. Las probetas se observaron en cuatro momentos hasta el día 14 de incubación, periodo en que permanecieron en cajas con humedad y temperatura controladas. Las condiciones correspondieron a madera sin tratamiento ni hongo (control de esterilidad, que comprueba que la madera parte limpia), madera sin tratamiento y con hongo (control de crecimiento, que comprueba que el hongo es capaz de desarrollarse), aceite esencial de romerillo al 8 % (comparador vegetal), aceite esencial de boldo al 8 % (tratamiento propuesto) y el preservante comercial Cerestain (comparador comercial). Todas las probetas fueron de madera de coigüe sana, desnuda y porosa.

Criterio de lectura. En cada momento de observación se revisó si la superficie de la probeta, es decir, cada bloque de madera ensayado presentaba micelio visible, que corresponde a la red de filamentos que forma el hongo al crecer. Se consignó "crecimiento" cuando el micelio se observó a simple vista y "sin crecimiento visible" en caso contrario. La comparación en el tiempo se realizó sobre una misma cepa a lo largo de los cuatro momentos.

Tabla 17. Síntesis del resultado del ensayo por condición al día 14 de incubación. Fuente: elaboración propia a partir de C. Murúa, informe de laboratorio (2026).

Condición de la madera	Cepa 1 (Día 14)		Cepa 2 (Día 14)		Cepa 3 (Día 14)	
Sin inocular		Sin crecimiento visible		Sin crecimiento visible		Sin crecimiento visible
Sin tratamiento		Crecimiento		Crecimiento		Crecimiento
Romerillo 8 %		Crecimiento		Crecimiento		Crecimiento
Boldo 8 %		Sin crecimiento visible		Sin crecimiento visible		Sin crecimiento visible
Comercial (Cerestain)		Crecimiento		Crecimiento		Sin crecimiento visible

Nota. La tabla muestra una probeta representativa por columna al día 14. El registro completo de las tres cepas y los cuatro momentos de observación (días 3, 7, 10 y 14) se incluye en el Anexo A.

El control sin inocular no presentó crecimiento, lo que confirma la esterilidad de la condición de partida (la madera parte libre de hongos). El control inoculado sin tratamiento presentó crecimiento micelial en las tres cepas, lo que confirma la viabilidad del inóculo (el hongo introducido logra desarrollarse) y que el sustrato es susceptible de ser colonizado. Sobre esa base se leen los tres tratamientos.

El aceite esencial de boldo al 8 % no presentó crecimiento visible en ninguna de las tres cepas ni en ninguno de los cuatro tiempos de observación. El aceite esencial de romerillo, empleado como comparador vegetal, presentó crecimiento en las tres cepas al día 14. El producto comercial Cerestain impidió el crecimiento solo en la Cepa 3 y no en las Cepas 1 y 2.

El resultado permite afirmar que, en las condiciones del ensayo, el aceite esencial de boldo previene la aparición temprana de crecimiento fúngico sobre madera de coigüe sana frente a las tres cepas aisladas del caso de estudio. Se trata de un desempeño consistente entre cepas, a diferencia del observado en las otras dos condiciones tratadas.

Alcance y limitaciones del resultado. El resultado debe leerse dentro de límites precisos. Primero, el ensayo evaluó prevención temprana hasta el día 14 y no durabilidad en el tiempo, por lo que no permite afirmar protección prolongada. Segundo, se realizó sobre maderas de coigüe sana en condiciones de laboratorio, distintas de la exposición real del inmueble. Tercero, y de mayor peso, las tres cepas no cuentan aún con identificación taxonómica, tarea pendiente e indispensable para interpretar el alcance del resultado. La determinación de la concentración mínima inhibitoria tampoco pudo establecerse en esta serie y se traslada a trabajo futuro.

2. Evaluación de conformidad

Formulado el protocolo y obtenido el resultado del ensayo, se evaluó su conformidad frente a las exigencias de ambos marcos normativos mediante la matriz siguiente.

Tabla 18. Matriz de conformidad del tratamiento propuesto frente al estándar vigente. Fuente: elaboración propia.

Exigencia	CCA	Aceite esencial de boldo
Marco constructivo		
Protege la madera de reposición no durable	Cumple	Cumple parcialmente, en régimen preventivo
Preservante autorizado por NCh790	Cumple	No cumple, requiere registro
Autorización SAG vigente	Cumple	No cumple, requiere registro
Principios patrimoniales		
Mínima intervención	No cumple, fijación permanente	Cumple
Compatibilidad de materiales	No cumple, metales pesados	Por verificar
Carácter no permanente y renovable	No cumple	Cumple
Aplicación en el propio inmueble	No cumple, exige planta	Cumple
No alteración del aspecto superficial	No cumple, altera color	Por verificar

Las celdas de compatibilidad y no alteración del aspecto superficial se consignan como por verificar y no como cumplida. El origen vegetal del principio activo no demuestra por sí solo compatibilidad

con el sustrato ni con el conjunto material del inmueble. Quedan por verificar la interacción química con la madera, los cambios de color, brillo y olor, la permeabilidad al vapor, la humectación de la superficie, la adhesión de futuras terminaciones y la corrosión de herrajes. Estas verificaciones se incorporan a trabajo futuro.

La matriz muestra que el CCA satisface el marco constructivo, pero incumple de manera sistemática los Principios patrimoniales, mientras que el aceite esencial de boldo satisface los criterios patrimoniales, pero no cuenta con el registro y las autorizaciones que hoy exige el marco constructivo. Ninguna de las dos alternativas cumple simultáneamente ambos marcos con la evidencia disponible. El aporte de la propuesta consiste en abrir una vía que, sujeta a registro y a las verificaciones pendientes, podría satisfacer a la vez exigencias que hoy ningún tratamiento disponible resuelve en conjunto.

3. Nivel de madurez del prototipo

El conjunto de resultados sitúa la propuesta en una etapa de prueba de concepto en laboratorio. Se dispone de evidencia de laboratorio sobre prevención temprana frente a tres cepas del caso de estudio, de un instrumento de aplicación arquitectónica y de una evaluación de conformidad normativa. Quedan pendientes la identificación taxonómica de las cepas, la determinación de la concentración mínima inhibitoria, los ensayos de durabilidad, la verificación de compatibilidad material y, sobre todo, la validación en terreno del tratamiento sobre el edificio. La propuesta queda planteada como una línea de desarrollo con respaldo inicial de laboratorio y no como una especificación cerrada de aplicación.

CONCLUSIÓN

En el plano experimental, los resultados respaldan la hipótesis de investigación. En laboratorio y durante 14 días de observación, el aceite esencial de boldo, aplicado por doble impregnación sobre madera de coigüe sana, previno la aparición temprana de los hongos xilófagos aislados de la Iglesia Natividad de María de Ichuac en las tres cepas ensayadas, comportamiento que no mostraron el comparador vegetal ni el tratamiento comercial. Dentro de esos límites, el resultado sugiere una capacidad preventiva temprana, no una eficacia demostrada ni una durabilidad en el tiempo, y la aplicación superficial con brocha que propone el protocolo queda por verificar.

El aporte no reside en el biocida, materia de otra disciplina, sino en el instrumento que permitiría aplicarlo sobre el edificio. La memoria traduce el resultado en un protocolo proyectual con una carta de superficies aptas, un régimen de reaplicación zonificado por orientación y una modalidad de ejecución comunitaria anclada en la minga. Frente al vacío normativo que originó la investigación, su matriz de conformidad ofrece un criterio para que la decisión sobre el material patrimonial deje de resolverse por defecto a favor del preservante industrial. Con ello se cumplen los tres objetivos específicos y, a nivel de prueba de concepto, el objetivo general.

Esta posibilidad queda planteada como hipótesis de proyecto y no como resultado validado, pues su confirmación depende de experimentos aún pendientes. La investigación alcanza una prueba de concepto en laboratorio, con el método formulado y la vía de aplicación definida, y su siguiente paso es la validación en terreno sobre el edificio. Ahí reside el sentido último del trabajo, que no busca cerrar el problema sino abrir una línea de desarrollo concreta y transferible a las demás iglesias de la Escuela Chilota, allí donde la norma hoy solo ofrece elegir entre durabilidad y autenticidad.

TRABAJO FUTURO

Las limitaciones declaradas en la metodología y en los resultados definen la agenda de continuidad de esta investigación.

En el plano biológico, resulta prioritaria la identificación taxonómica de las tres cepas, es decir, determinar a qué especie corresponde cada hongo. De ella depende atribuir el resultado a un tipo de pudrición, considerando la menor eficacia de los aceites esenciales frente a la pudrición blanca.

En el plano experimental, se requiere determinar la concentración mínima inhibitoria, o dosis más baja capaz de impedir el crecimiento del hongo, y ejecutar un ensayo normalizado de pérdida de masa que permita pasar de una evaluación cualitativa a una de eficacia. Corresponde además ensayar el envejecimiento y el lavado del producto por agua, extender el ensayo al ciprés de las Guaitecas y al mañío, y evaluar la aplicación con brocha, que es la vía del protocolo.

En el plano del comportamiento en servicio, la tarea central es la validación en terreno con probetas expuestas en las cuatro orientaciones y seguimiento por temporada, para ajustar las frecuencias de reaplicación. A ello se suma verificar la alteración de color y la compatibilidad con herrajes y terminaciones.

Finalmente, en el plano normativo, la aplicación sobre un Monumento Nacional requiere el registro del producto ante el Servicio Agrícola y Ganadero (D.S. N° 3557 de 1980) y la autorización previa del Consejo de Monumentos Nacionales, junto con un análisis de costos y una comparación frente a un preservante autorizado por la NCh790.

BIBLIOGRAFÍA

Artículos y libros

Ahmed, N., Boyd-Shields, G. D., Stokes, C. E., y Hassan, E. B. (2026). Nano-chitosan formulations and essential oil encapsulation for sustainable wood protection: A comprehensive review. *Applied Sciences*, 16(5), 2207. <https://doi.org/10.3390/app16052207>

Bahmani, M., y Schmidt, O. (2018). Plant essential oils for environment-friendly protection of wood objects against fungi. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 20(3), 325 a 332. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2018005003301>

Bakken, K. (Ed.). (2016). *Preserving the stave churches: Craftsmanship and research*. Pax Forlag.

Becerra, J., Bittner, M., Hernández, V., Brintrup, C., Becerra, J., y Silva, M. (2010). Actividad de aceites esenciales de canelo, queule, bailahuén y culén frente a hongos fitopatógenos. *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas*, 9(3), 212 a 215.

Berg Costa, L. (2015). *Rastreo de las influencias y precedentes en la composición arquitectónica de las iglesias tradicionales de Chiloé* [tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid]. Archivo Digital UPM. <https://oa.upm.es/50765/>

Bittner, M., Aguilera, M. A., Hernández, V., Arbert, C., Becerra, J., y Casanueva, M. E. (2009). Fungistatic activity of essential oils extracted from *Peumus boldus* Mol., *Laureliopsis philippiana* (Looser) Schodde and *Laurelia sempervirens* (Ruiz & Pav.) Tul. (Chilean Monimiaceae). *Chilean Journal of Agricultural Research*, 69(1), 30 a 37. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392009000100004>

Humar, M., y Lesar, B. (2013). Efficacy of linseed- and tung-oil-treated wood against wood-decay fungi and water uptake. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 85, 223 a 227. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.07.011>

Lebow, S., y Anthony, R. W. (2012). Guide for use of wood preservatives in historic structures (General Technical Report FPL-GTR-217). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

Ortiz, R., Párraga, M., Navarrete, J., Carrasco, I., de la Vega, E., Ortiz, M., Herrera, P., Jurgens, J. A., Held, B. W., y Blanchette, R. A. (2014). Investigations of biodeterioration by fungi in historic wooden churches of Chiloé, Chile. *Microbial Ecology*, 67(3), 568 a 575. <https://doi.org/10.1007/s00248-013-0358-1>

Palla, F., Bruno, M., Mercurio, F., Tantillo, A., y Rotolo, V. (2020). Essential oils as natural biocides in conservation of cultural heritage. *Molecules*, 25(3), 730. <https://doi.org/10.3390/molecules25030730>

Pánek, M., Reinprecht, L., y Hulla, M. (2014). Ten essential oils for beech wood protection: Efficacy against wood-destroying fungi and moulds, and effect on wood discoloration. *BioResources*, 9(3), 5588 a 5603.

Passone, M. A., y Etcheverry, M. (2014). Antifungal impact of volatile fractions of *Peumus boldus* and *Lippia turbinata* on *Aspergillus* section *Flavi* and residual levels of these oils in irradiated peanut. *International Journal of Food Microbiology*, 168 a 169, 17 a 23. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2013.10.009>

Tumajer, J., Braun, S., Burger, A., Scharnweber, T., Smiljanic, M., Walthert, L., Zweifel, R., y Wilmking, M. (2023). Dendrometers challenge the 'moon wood concept' by elucidating the absence of lunar cycles in tree stem radius oscillation. *Scientific Reports*, 13, 19904. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-47013-y>

Yang, V. W., y Clausen, C. A. (2007). Antifungal effect of essential oils on southern yellow pine. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 59(4), 302 a 306. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2006.09.004>

Patentes

Biofungitek, S.L. (2020). Phytosanitary composition comprising essential oils that potentiate antifungal activity [Composición fitosanitaria que comprende aceites esenciales que potencian la actividad antifúngica] (Patente US10813360B2). United States Patent and Trademark Office.

Universidad del Bío-Bío y Centro de Investigación de Polímeros Avanzados (CIPA). (2024). Wood preserving composition and preparation method thereof [Composición para la preservación de la madera y su método de preparación] (Patente WO2024000081). Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (OMPI).

Yang, V. W., y Clausen, C. A. (2015). Essential oils inhibit mold on wood [Aceites esenciales que inhiben el moho en la madera] (Patente US8986757B2). United States Patent and Trademark Office.

Normativa y documentos institucionales

Carta de Venecia. (1964). Carta internacional sobre la conservación y la restauración de monumentos y sitios. ICOMOS.

Comisión Europea. (2003). Directiva 2003/2/CE, de 6 de enero de 2003, relativa a las restricciones a la comercialización y el uso del arsénico (décima adaptación al progreso técnico de la Directiva 76/769/CEE). Diario Oficial de las Comunidades Europeas, L 4, 9 de enero de 2003.

Comité Científico de Toxicidad, Ecotoxicidad y Medio Ambiente (CSTEE). (1998). Opinion on the assessment of the risks to health and to the environment of arsenic in wood preservatives and of the effects of further restrictions on its marketing and use. Comisión Europea.

Consejo de Monumentos Nacionales. (2023). Acta de Sesión Extraordinaria del 18 de octubre de 2023. Santiago, Chile.

Decreto Exento N°222. (1999). Declara Monumento Histórico las iglesias de San Juan Bautista de San Juan, Nuestra Señora del Patrocinio de Tenaún, San Antonio de Colo, Jesús Nazareno de Aldachildo, Natividad de María de Ichuac y Santiago Apóstol de Detif. Ministerio de Educación, Chile.

Decreto Supremo N° 490. (1976). Declara Monumento Natural al alerce. Ministerio de Agricultura, Chile.

Decreto Supremo N° 3557. (1980). Establece disposiciones sobre protección agrícola. Ministerio de Agricultura, Chile.

Documento de Nara sobre autenticidad. (1994). ICOMOS.

ICOMOS. (2017). Principios para la conservación del patrimonio construido en madera [Principles for the Conservation of Wooden Built Heritage].

Instituto Nacional de Normalización. (1987). NCh789/1. Maderas: Clasificación según su durabilidad natural. Santiago, Chile.

Instituto Nacional de Normalización. (2012). NCh790: Preservantes para maderas. Santiago, Chile.

Instituto Nacional de Normalización. (2019). NCh819:2019. Madera preservada: Clasificación y requisitos. Santiago, Chile.

Ley N° 17.288 de Monumentos Nacionales. (1970). Ministerio de Educación, Chile.

Ley N° 20.283 sobre Recuperación del Bosque Nativo y Fomento Forestal. (2008). Ministerio de Agricultura, Chile.

Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2018). Manual de control de calidad de obra (Vol. 3, Serie 3: Estándares Técnicos de Construcción). MINVU, Chile.

Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones. Artículo 5.6.8. Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Chile.

US EPA (Environmental Protection Agency). (2002). Whitman announces transition from consumer use of treated wood containing arsenic [Comunicado de prensa, 12 de febrero de 2002]. U.S. Environmental Protection Agency.

Otras fuentes

Catalán, J. L. (2025). Entrevista sobre técnicas constructivas y selección de maderas en las iglesias patrimoniales de Chiloé [comunicación personal]. Asociación de Carpinteros Patrimoniales de Chiloé.

Concón Maderas Impregnadas. (s.f.). Recomendaciones de uso. Recuperado el 20 de junio de 2026 de <https://conconmaderas.cl/recomendaciones-de-uso/>

Consejo de Monumentos Nacionales. (2026). Consejo de Monumentos Nacionales autoriza reposición de emergencia de puntales en Iglesia de Ichuac [noticia, 8 de abril de 2026]. <https://www.monumentos.gob.cl/noticias/consejo-de-monumentos-nacionales-autoriza-reposicion-de-emergencia-de-puntales-en-iglesia>

Cruz Campos, N. (2025). Planimetría de arquitectura existente de la Iglesia Natividad de María de Ichuac (Láminas L00 a L12) [planos no publicados]. Fundación Iglesias Patrimoniales de Chiloé.

Dirección Meteorológica de Chile. (s.f.). Datos climatológicos de la estación Mocopulli, Castro (código 420014), serie 2014 a 2025. Servicios Climáticos. Recuperado el 20 de junio de 2026 de <https://climatologia.meteochile.gob.cl/>

Fundación Iglesias Patrimoniales de Chiloé. (s.f.). La arquitectura. Recuperado el 20 de junio de 2026 de <https://www.iglesiaschiloe.cl/la-arquitectura/>

Murúa, C. (2026). Registro fotográfico del ensayo antifúngico sobre probetas de coigüe [material no publicado]. Centro de Biotecnología Dr. Daniel Alkalay Lowitt, Universidad Técnica Federico Santa María.

Rojas, G. (2017). Árboles urbanos XV: Boldo. Museo Nacional de Historia Natural. <https://www.mnhn.gob.cl/noticias/arboles-urbanos-xv-boldo>

Ruta de las Iglesias de Chiloé. (s.f.). Iglesia Natividad de María de Ichuac. Recuperado el 20 de junio de 2026 de <https://www.rutaiglesiaschiloe.cl/iglesias/ichuac>

Subsecretaría del Patrimonio Cultural. (2019). Iglesias de Chiloé, Patrimonio Mundial. Ministerio de las Culturas, las Artes y el Patrimonio, Chile.

UNESCO. (1999). Wooden Churches of Maramureș [Iglesias de madera de Maramureș]. Lista del Patrimonio Mundial. Centro del Patrimonio Mundial.

UNESCO. (2000). Declaración de Valor Universal Excepcional: Iglesias de Chiloé. Centro del Patrimonio Mundial.

ANEXO

Anexo A. Registro fotográfico del ensayo experimental. Comprende las tres cepas ensayadas, los cuatro tiempos de observación (días 3, 7, 10 y 14) y las tres réplicas por condición, según el informe de laboratorio de C. Murúa (2026).

Tabla N°2: comparación a través de los días de las maderas sin tratamiento y sin inocular. En coihue

Día	Replica 1	Replica 2	Replica 3
3			
7			
10			
14			

 Tabla N°3: comparación a través de los días de las maderas sin tratamiento inoculadas.

Cepa	Día	Replica 1	Replica 2	Replica 3
1	3			
1	7			
1	10			

1	14			
2	3			
2	7			
2	10			
2	14			
3	3			
3	7			
3	10			
3	14			

Tabla N°4: comparación a través de los días de las maderas tratadas con aceite esencial de romerillo inoculadas

Cepa	Día	Replica 1	Replica 2	Replica 3
1	3			
1	7			
1	10			
1	14			
2	3			
2	7			
2	10			
2	14			

3	3			
3	7			
3	10			
3	14			

Tabla N°5: comparación a través de los días de las maderas tratadas con aceite esencial de boldo inoculadas

Cepa	Día	Replica 1	Replica 2	Replica 3
1	3			
1	7			
1	10			
1	14			

2	3			
2	7			
2	10			
2	14			
3	3			
3	7			
3	10			
3	14			

Tabla N°5: comparación a través de los días de las maderas tratadas con el tratamiento comercial (cerestain) inoculadas

Cepa	Día	Replica 1	Replica 2	Replica 3
1	3			

1	7			
1	10			
1	14			
2	3			
2	7			
2	10			
2	14			
3	3			
3	7			
3	10			
3	14			