

# ENSAYOS DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y PERMEABILIDAD A LA DIFUSIÓN DE VAPOR DE AGUA DE MATERIALES EN BASE A TIERRA

**Ignacio Conde Bueno<sup>1</sup>, Daniele Santavicca<sup>2</sup>, Sebastián Gutiérrez Donoso<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>TramaLar / Gremio de Bioconstrucción de Chile; [investigacionynormativa@gremiobioconstruccion.cl](mailto:investigacionynormativa@gremiobioconstruccion.cl);

<sup>2</sup>Cooperativa Panal / Gremio de Bioconstrucción de Chile; [mesatrabajominvu@gremiobioconstruccion.cl](mailto:mesatrabajominvu@gremiobioconstruccion.cl);

<sup>3</sup>Mulch Oficinas / Gremio de Bioconstrucción de Chile; [directiva@gremiobioconstruccion.cl](mailto:directiva@gremiobioconstruccion.cl)

**Palabras clave:** arcilla-celulosa, propiedades térmicas, fibras, adobe, tierra aligerada

## Resumen

En el presente artículo se presentan los resultados obtenidos de ensayos de conductividad térmica y permeabilidad al vapor de agua de diferentes materiales naturales en base a tierra y fibras (revoques de tierra, bloque arcilla-celulosa, adobe, tierra aligerada, adobillo). El objetivo de este artículo es triple: por un lado, actualizar los valores de materiales naturales contenidos en la norma NCh-853 (adobe, morteros); por otro lado, obtener datos científicos que permitan, en un futuro, poder incluir dichos materiales en los listados de materiales aceptados por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) de Chile; y, por último, comparar los resultados con otros estudios similares ejecutados en diversas partes del mundo. Los resultados obtenidos demuestran que los materiales con más fibra en su composición y menor densidad aparente tienen un desempeño térmico mayor y bien valorado; el adobe arroja resultados muy superiores a lo estipulado en la normativa actual. Si bien es complejo la normalización de este tipo de materiales debido a su heterogeneidad, a través de estos ensayos se espera poder llegar a un rango de valores que permitan realizar los cálculos pertinentes y poder cumplir con las necesidades higrotérmicas incluidas en la normativa del país. Estos resultados son un punto de partida para desarrollar más investigación acerca de materiales y soluciones constructivas en base a tierra y fibras con el fin último de que sean incluidos en los listados oficiales de materiales normados y así poder ser seleccionables para diseño y ejecución de viviendas sociales.

## 1 INTRODUCCIÓN

El Gremio de Bioconstrucción de Chile es una red multidisciplinaria de apoyo y colaboración de personas vinculadas a la bioconstrucción con el objetivo común de recopilar, investigar, desarrollar, validar y poner a disposición de la sociedad sistemas y soluciones constructivas más armónicas con el entorno, que prioricen el cuidado de la salud de las personas y el medio ambiente, valorando saberes constructivos ancestrales, integrando tecnología e innovación para avanzar en la construcción sostenible.

En el año 2021 se crea una alianza entre el Gremio de Bioconstrucción de Chile y la División Técnica de Estudio y Fomento Habitacional (DITEC) del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU), con la finalidad de ensayar materiales naturales en laboratorios certificados, para comprobar y respaldar su comportamiento físico-mecánico y validarlos técnicamente ante la normativa nacional vigente, con la intención de que éstos sean incluidos en los listados oficiales de soluciones constructivas contempladas por el MINVU.

El artículo pretende: a) exponer y difundir los resultados obtenidos de los ensayos de conductividad térmica y permeabilidad al paso del vapor de agua realizados durante el año 2023 a diversos componentes constructivos; b) actualizar los valores de materiales naturales contenidos en la norma NCh-853 (2008), c) obtener datos científicos que permitan, en un futuro, incluir en los listados de materiales aceptados por el MINVU de Chile; y, d) presentar un análisis comparativo de los resultados obtenidos con otros resultados de ensayos realizados a materiales en base a tierra y fibras en diferentes partes del mundo y con algunos materiales empleados usualmente en la construcción convencional.

Los resultados serán de código abierto, siendo accesible a cualquier persona interesada en consultar dicha información.

La conductividad térmica es la propiedad física de los materiales que indica su capacidad para transmitir o conducir calor. Se representa con la letra  $\lambda$  y su unidad de medida es  $W/m \times K$ . Cuanto mayor sea la conductividad térmica de un material, más eficientemente puede transferir calor, es decir, opone menor resistencia para que el calor pase a través de él y, por lo tanto, menor es su capacidad de funcionar como aislamiento térmico o evitar la pérdida de calor.

Por otro lado, la permeabilidad al paso del vapor de agua, o difusión de vapor, es la propiedad física que indica la capacidad de un material para permitir el paso del vapor de agua a través de él. Se representa con la letra " $\delta$ " y su unidad de medida es  $mg/m \times h \times Pa$ . Es una medida importante para evaluar la transpirabilidad, la resistencia a la humedad y la impermeabilidad de materiales en distintos contextos. Esta propiedad indica si un material es más propenso a generar condensaciones en su interior según distintas condiciones higrotérmicas del entorno. Debido a que la mayoría de los materiales presenta valores de permeabilidades al vapor muy bajos cuando se expresan en las unidades habituales, comúnmente se usa el factor de resistencia a la difusión del vapor " $\mu$ ", que expresa la permeabilidad al vapor de agua de un material en relación a la permeabilidad del aire en forma adimensional, es decir, sin unidad de medida. Un material con baja permeabilidad al vapor, es decir, que no permite el paso del vapor de agua, presenta un factor de resistencia a la difusión del vapor elevado.

Conocer estas propiedades de los materiales que se emplean en construcción permite realizar un adecuado diseño de las soluciones constructivas, especialmente aquellos que conforman la envolvente de las construcciones, para asegurar un óptimo comportamiento higrotérmico, un adecuado confort térmico y una buena calidad del aire en el interior de la edificación.

## 2 METODOLOGÍA

En la tabla 1 se indican los componentes constructivos seleccionados, el tipo de ensayo a los que fueron sometidos y las dimensiones de las probetas solicitadas por cada laboratorio en los que se realizaron los ensayos.

Tabla 1. Componente constructivo y ensayos realizados

Componente constructivo	Conductividad térmica	Permeabilidad al paso de vapor de agua	Probeta (cm)	Laboratorio certificado
Revoque grueso	x		30x30x2,5	CITEC UBB <sup>1</sup>
Revoque fino	x		30x30x2,5	CITEC UBB <sup>1</sup>
Adobe*	x		50x50x5	IDIEM <sup>2</sup>
Adobillo		x	16x16x3	CITEC UBB <sup>1</sup>
Tierra aligerada*	x	x	50x50x5 30x30x3	IDIEM <sup>2</sup>
Bloque arcilla-celulosa	x	x	30x30x2,5 16x16x2,5	CITEC UBB <sup>1</sup>
Norma del ensayo	NCh 850	NCh 2457		

<sup>1</sup> Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción de la Universidad del Bío (Concepción, Chile)

<sup>2</sup> Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación de Estructuras y Materiales (Santiago, Chile)

\* Componentes constructivos ensayados bajo el marco de un proyecto de investigación FONDART ejecutado en 2022-2023

Los ensayos de conductividad térmica se realizaron siguiendo el procedimiento descrito en la NCh 850 (2008) que establece el uso de la placa caliente de guarda para medir la transferencia de calor en estado estacionario a través de especímenes de bloque plano y el cálculo de sus propiedades de transferencia de calor. Este es un método absoluto o principal de medición de las propiedades de transferencia de calor, ya que sólo se requieren las mediciones de longitud, temperatura y potencia eléctrica. Las dimensiones de las probetas para este ensayo son especificadas por los laboratorios donde se llevaron a cabo los ensayos. En este caso se hicieron ensayos en dos laboratorios distintos y las dimensiones finales de las probetas son: 50x50x5 cm en el caso de los laboratorios de IDIEM y de 30x30x2,5 cm en el caso de los laboratorios de CITEC UBB.

Por otro lado, los ensayos de permeabilidad a la difusión del vapor de agua se llevaron a cabo según el procedimiento especificado en la NCh 2457 (2014) que especifica un método basado en ensayos de plato para determinar la permeancia al vapor de agua de los productos de edificación y la permeabilidad de los materiales de construcción bajo condiciones isotermas. Se especifican diferentes tipos de condiciones de ensayo. Los principios generales son aplicables a todos los materiales y productos de edificación higroscópicos y no higroscópicos, incluidos aquellos con recubrimientos y capas. En este caso se hicieron ensayos en dos laboratorios distintos y las dimensiones finales de las probetas son: 30x30x3 cm en el caso de los laboratorios de IDIEM y de 30x30x2,5 cm o 30x30x3 cm en el caso de los laboratorios de CITEC UBB.

Las pruebas y ensayos de campo que se llevaron a cabo para la caracterización de todas las tierras usadas en los distintos componentes fueron extraídas del capítulo 6 de Colección FAO Capacitación (sf), la guía de selección de suelos de la Red PROTERRA (Neves et al., 2010) y la norma E.080 (2017). Estos ensayos de campo permiten conocer la textura de las tierras usadas, esto es, el contenido relativo de partículas de diferente tamaño, como la arena, el limo y la arcilla. Los ensayos de campo realizados fueron los siguientes: pruebas de sentidos (tacto, vista, olfato), prueba de caída de la bola, prueba de sedimentación, prueba de pastilla seca, prueba del cigarro o del rulo, test de retracción. A continuación, se expone la metodología utilizada para cada componente.

## 2.1 Revoques de tierra

Los revoques o revocos de tierra son el revestimiento que se aplica sobre distintos soportes cumpliendo una función estética y de protección frente a las inclemencias del tiempo, generalmente son continuos y son aplicados en varias capas o tendidas, con un espesor final que varía de entre 3 cm hasta 5 cm en algunos casos.

El revoque grueso es la capa base de regularización, cumple la función de proteger la estructura y el relleno aislante. El revoque fino es la capa estética final que proporciona una superficie lisa y sin fisuras, y sirve de protección del revoque grueso frente a la abrasión y erosión. En algunas ocasiones a la dosificación de este último se incluyen aditivos que confieren propiedades específicas con respecto a dureza, capacidad hidrófuga, entre otras, o a través de una capa final de pintura.

Para la fabricación de las probetas de revoque se utilizó como base la tierra de una cantera ubicada en la localidad de Cauquenes, caracterizada como tierra areno-arcillosa tras las pertinentes pruebas de campo. El resto de los elementos que conforman la mezcla son la fibra de paja de trigo (obtenido en formato de fardo en la misma localidad) y arena de río procedente de Cauquenes y Longaví.

Este componente se ensayó la conductividad térmica en los laboratorios de CITEC-UBB. Las dimensiones de las probetas son de 30x30x2,5 cm. Para el ensayo se solicitó por parte del laboratorio 3 probetas de cada componente. Se ejecutaron 5 probetas de cada tipo de revoque para tener probeta de reemplazo en el caso de que se dañase alguna durante el transporte al laboratorio.

Las mezclas se realizaron en seco siguiendo las proporciones indicadas más abajo,

agregando el agua de forma gradual, buscando una consistencia plástica homogénea en el mortero. Una vez terminado este proceso, las mezclas se dejaron reposar durante 24 horas con la finalidad de que adquiriesen mayor cohesión y plasticidad.

Las probetas se elaboraron aplicando la técnica del chicoteo, rellenando los moldes fabricados previamente sobre una superficie plastificada para evitar su adhesión a la mesa de trabajo. Posteriormente se compactó y niveló la mezcla ejerciendo una presión moderada mediante platacho (fratás) de madera. Una vez la mezcla adquirió mayor firmeza, se procedió a retirar uno de los lados del molde para, con la ayuda del platacho, evacuar el aire atrapado en la mezcla, otorgando mayor compactación y resistencia a la probeta. Las probetas de revoque fino se sellaron mediante planchado con llana metálica.

Se comenzó a observar que las probetas estaban prácticamente secas después del cuarto día a contar desde la fecha de su fabricación. Una vez finalizado el secado al aire libre, las probetas se transportaron al laboratorio del CITEC UBB donde terminaron el proceso de secado hasta alcanzar masa constante.



Figura 1 Cantera de tierra / Probetas de revoque grueso / Probetas de revoque fino

Las dosificaciones de las mezclas se describen a continuación:

1. Revoque grueso: Para la fabricación de las probetas de revoque grueso tanto la tierra como la arena, en este caso arena rubia de río, se pasaron por un tamiz de 4 mm y se añadieron fibras de paja de trigo con una longitud no mayor a 10 cm. La relación volumétrica en la dosificación entre tierra areno-arcillosa, arena y fibra de trigo fue de 1:1:½ y se le añadió ½ volumen de agua
2. Revoque fino: a diferencia del revoque grueso, tanto la tierra como la arena se tamizaron mediante un colador de malla fina de 1 mm. La relación volumétrica en la dosificación entre tierra areno-arcillosa y arena fue de 1:1. Al volumen final de mezcla en seco se le añadió 3 volúmenes de agua.

Las densidades aparentes obtenidas tras secado en laboratorio fueron 1659 kg/m<sup>3</sup> para revoque grueso y 1687 kg/m<sup>3</sup> para revoque fino.

## 2.2 Adobe

El adobe es un bloque rectangular prefabricado compuesto de tierra arcillosa, agua y, dependiendo de la región, fibra de paja larga (McHenry, 1996). Con estos elementos se hace una mezcla plástica que se vuelca en un molde para obtener las dimensiones adecuadas y al desmoldar se seca a la intemperie.

Para conseguir el material de esta investigación, se compraron adobes<sup>1</sup> en la ciudad de Cauquenes, VII región de Chile, región que cuenta con un importante patrimonio de construcciones de adobe. Las dimensiones de estos adobes son aproximadamente de 50x30x7 cm.

<sup>1</sup> fabricados por el al maestro adobero Jorge Eduardo Lara Marín.

Las probetas para realizar los ensayos de conductividad térmica son de 50x50x5 cm, según los requerimientos del laboratorio de IDIEM, por lo que se tuvo que disgregar el adobe original, volver a hidratarlo hasta conseguir la plasticidad idónea, pisar la mezcla plástica, vaciarlo en un molde de madera con las dimensiones indicadas y dejarlo secar al aire hasta obtener una masa constante, indicativo de que se ha completado el secado.

Se caracterizó la tierra que conforma el adobe, basándose en pruebas y ensayos de campo comentadas al comienzo de este apartado. Las conclusiones tras las pruebas son que la tierra tiene un contenido de arcilla de aproximadamente 17% (Colección FAO Capacitación, sf), y que su composición junto con el resto de los agregados (arena fina: 30%; arena gruesa: 37%; y arcilla-limo:16%) es óptima para la elaboración de adobes, siendo las arenas las que proporcionan resistencia y la arcilla y arcilla-limosa hacen de elemento ligante y de cohesión (McHenry, 1996).

Asimismo, se midió la proporción de volumen de fibra (2 l) y tierra (7,4 l) con respecto al volumen total del adobe original (9,4 l), dando como resultado un volumen de paja de 21,3% y un volumen de tierra de 79,7%, que aproximadamente corresponde a una relación volumétrica de 1:4 (paja:tierra).

Se ejecutaron probetas con dos densidades, una con la misma proporción de paja del adobe original (21,3%) y otra añadiendo mayor contenido de paja (40%) en el mezcla de tierra en estado plástico, obteniendo finalmente dos densidades medias: 1653 kg/m<sup>3</sup> y 1444 kg/m<sup>3</sup> respectivamente. Durante el proceso de ejecución de las probetas se aprovechó para medir el tiempo de secado de una de las mismas, desde el desmolde hasta conseguir masa constante en condiciones ambientales, siendo el tiempo final de secado de aproximadamente 30 días. Las probetas se trasladaron a las instalaciones del IDIEM en Santiago donde ejecutaron los ensayos de conductividad térmica.



Figura 2. Pruebas de campo / Pisado de mezcla / Probeta de adobe

### 2.3 Adobillo

“El adobillo es un bloque de tierra y paja, sin cocer, que posee el detalle de una muesca o ranura en sus extremos para ser ensamblado a un tabique estructural de madera, formando un muro” (Dávila; Contreras, 2022, p. 11).

Para realizar las probetas de adobillo, se usó el material extraído de la cantera de Guido LeCerf<sup>2</sup>. Se decidió esto, ya que la mayor parte de los nuevos inmuebles y restauraciones realizadas en los últimos años eligieron los adobillos confeccionados en este lugar.

Para la caracterización de la tierra, según la información entregada el propietario de la cantera y ensayos de campo indicados más arriba, obteniendo las siguientes proporciones

<sup>2</sup> maestro que confecciona ladrillos, adobes y adobillos en la localidad de Valparaíso

aproximadas: 60% tierra arcillosa / 30% maicillo<sup>3</sup> / 10% fibra de paja de trigo.

Las probetas solicitadas por el laboratorio para realizar los ensayos de transmisión del vapor de agua fueron de 16x16x2,5 cm. Para esto, se fabricaron con 4-6 mm de holgura por cada lado (para compensar la retracción del material alto en arcilla). Luego, se procedió a triturar, hidratar y desintegrar los adobillos, la mezcla resultante se dejó reposar durante 16h y para luego verter a los moldes previamente hidratados. Las probetas se secaron al aire libre en una zona de sombra. Transcurridos 7 días fueron trasladadas al laboratorio del CITEC UBB. La densidad final tras secado en laboratorio fue de 1790 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 3. Moldes de adobillo / Pruebas de campo / Adobillo y probetas

## 2.4 Tierra aligerada

La tierra aligerada es una técnica que surge a principios del siglo XX en Alemania, consistente en rellenar una estructura portante de madera con una mezcla con alta proporción de fibras pegadas entre sí con arcilla en estado de barbotina (Hays et al., 1986). El relleno se inserta y compacta en un encofrado móvil que se desplaza verticalmente, por ello también se conoce esta técnica como paja encofrada en ciertos países.

Se construyeron moldes de madera con las dimensiones finales de las probetas (50x50x5 cm y 30x30x3 cm). La ejecución de las probetas se hizo de la manera más fiel a la ejecución de la técnica constructiva, con tablas a ambos lados para ir insertando por la parte superior la paja con barbotina en capas de unos 5 cm de espesor y compactadas manualmente con un pisón de madera. La fibra que se utilizó fue de paja de trigo con un valor promedio de humedad de 15,6%, valor que entra dentro del rango óptimo de humedad para el uso de este producto como material de construcción. La tierra con la que se ejecutó la barbotina es una tierra con un muy alto contenido de arcilla, obtenida en una cantera de la localidad de Quepe, IX región de la Araucanía, a la que se añadió agua en relación 1,7 litros de agua por litro de tierra arcillosa, resultando una barbotina con una densidad de 1006 kg/m<sup>3</sup>.

Este componente se quiso estudiar en dos densidades, intentando que éstas fuesen lo más bajas posibles, es decir, con la menor cantidad de barbotina. Para ello lo primero que se hizo fue proceder a rellenar y compactar el molde sólo con paja, para calcular cuánta masa de paja admitía el molde, dando como resultado 2,7 kg de paja para un volumen de 0,012 m<sup>3</sup> que tiene el molde. Con estos valores se obtuvo una densidad de paja ( $\rho$ ) de 213 kg/m<sup>3</sup>. El siguiente paso fue calcular el volumen de barbotina mínimo para que la probeta fuese estable una vez desmoldada y secada.

Para ello se hicieron varias pruebas con distintas cantidades de barbotina por kilogramo de paja: 0,5; 1 y 1,5 l/kg. Una vez secas y desmoldadas se procedió a evaluar su comportamiento a la manipulación. Si bien las probetas más livianas se separaron en dos

<sup>3</sup> normalmente suelos areno arcillosos de color amarillo, el maicillo es el producto de la meteorización de rocas graníticas del batolito costero y es uno de los suelos residuales más comunes y abundantes en Chile (Rodríguez Stuardo, 2016)

mitades debido a la dimensión de las mismas, cada una de estas mitades logró aguantar un peso considerable (44; 38 y 36 kg respectivamente), y se mantenían estables a la manipulación.

Finalmente se decidió usar la relación de 1 litro de barbotina por 1 kg de paja. Para evitar la separación de la probeta en su zona media, se decidió insertar en la misma unas varillas de colihue (*Chusquea culeou*) en la parte central de la probeta.

Para calcular el volumen máximo de barbotina por kilogramo de paja se procedió a sumergir la paja en barbotina y escurrirla antes de insertarla en el molde y apisonar la mezcla. Se tomó como referencia una cantidad conocida de barbotina, su densidad y la cantidad de paja al comienzo del relleno. Una vez ejecutada la probeta, se procedió a medir la barbotina restante y se obtuvo un valor de 3,7 l/kg y una densidad final tras secado de 356 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 4. Materia prima y molde / Ejecución de probeta / Prueba de resistencia / Probetas ejecutadas

Todas las probetas se ejecutaron mediante métodos manuales con los datos obtenidos en las pruebas previas. Se ejecutaron 3 probetas por cada densidad y ensayo. Los valores finales de densidad promedio fueron los siguientes: para ensayo de conductividad térmica 233 y 357 kg/m<sup>3</sup>; para ensayo de permeabilidad de vapor de agua 242 y 291 kg/m<sup>3</sup>. Las probetas se ensayaron en los laboratorios de IDIEM en Santiago de Chile.

## 2.5 Bloque de arcilla-celulosa (BAC)

Se definen así a los bloques prensados realizados con celulosa y arcilla en una matriz de diversos tamaños. La investigación y experimentación sobre esta técnica ha sido desarrollada durante más de 10 años en el Laboratorio de Arcilla Natural Sin Cocer, de la oficina de arquitectura Gaia Oslo<sup>4</sup>. La investigación que está realizando el Lab Const con arcillas de la oficina de arquitectura Gaia Oslo es para la obtención de “fibras urbanas”, donde se inserta esta técnica que se ha transferido e integrado a la mesa de trabajo del Gremio de bioconstrucción de Chile, y a la cual se le ha denominado como bloque de arcilla

<sup>4</sup> Esta investigación es desarrollada por el arquitecto Julio E. Pérez en Noruega. Gracias a la labor del artista italiano Paolo Spalluto en el estudio de construcción histórica con papel y cal en Noruega, pudieron aprender con el arquitecto Rolf Jacobsen a transformar periódicos en celulosa.

celulosa (BAC).

Para la creación de los bloques se usó arcilla pura de color gris de Pichilemu, obtenida, cernida y tipificada como materia prima en la Casa del Ceramista en Santiago de Chile. Para el componente de celulosa se realizó acopio de papel reciclado, en este caso, se trabajó con papel de diario descartado. Este papel fue trozado en franjas de aproximadamente 3 cm, para después dejar en remojo por al menos 24 horas. Posterior a esto se realizó la molienda del papel con revolvedora de mezcla, hasta obtener una textura de pulpa homogénea.

Para la extracción de agua de la pulpa se vertió la mezcla en una bolsa de género, se le comprimió con peso superior y se dejó escurrir el agua durante 12 horas. Una vez obtenida la pulpa cuajada se le adicionó arcilla en estado plástico y viruta de madera, quedando en las proporciones en volumen de 72% celulosa, 14% de arcilla y 14% de viruta de madera tamizada con harnero de 3 mm. Se mezcló nuevamente con máquina revolvedora (marca Dong Cheng de 1400W de potencia) hasta obtener una consistencia uniforme.

Dicha mezcla fue puesta en la prensa desarrollada con un moldaje en las medidas solicitadas (30x30x2,5 cm y 16x16x2,5 cm), para después ser sometida a presión hasta que se filtra la mayor cantidad de agua que quedaba presente. Esta prensa, creada para el uso exclusivo de bloques de arcilla y celulosa, presenta orificios en su base para el correcto cuajado de la mezcla durante la compresión. Una vez prensado el material, se retiró de la prensa para ser colocado en el mesón donde se procedió a afinar las irregularidades de la cara superior.

Después de 3 días de secado se retiraron sus respectivos moldajes, para facilitar el proceso. El proceso de secado duró 8 días, donde fueron enviados a los laboratorios del CITEC UBB donde terminó el proceso de secado. La densidad media final tras secado en laboratorio fue de 604 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 5. Arcilla / Papel de diario / Mezcla con serrín / Probetas secas

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las tablas 2 y 3 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos realizados de conductividad térmica y el factor de resistencia al vapor de agua que se desprende de los ensayos de permeabilidad al vapor de agua. Los valores indicados son los valores promedio de las 3 probetas que se ensayaron por cada material.

Tabla 2. Resultados de ensayos de conductividad térmica

Muestra	Densidad promedio ( $\rho$ ) (kg/m <sup>3</sup> )	Conductividad térmica promedio ( $\lambda$ ) (W/m×K)
Tierra aligerada D1	232,8	0,1057*
Tierra aligerada D2	356,7	0,1063*
Adobe D1	1653,0	0,4323
Adobe D2	1443,9	0,3663
Revoque grueso de tierra	1659,3	0,7253
Revoque fino de tierra	1686,7	0,5293
Bloque de arcilla celulosa	604,0	0,1800

\*En tres de las seis probetas obtuvieron valores de conductividad térmica por debajo de 0,1 W/m×K (0,073; 0,096; 0,088)

Tabla 3. Resultados de ensayos de permeabilidad al vapor de agua

Muestra	Densidad promedio ( $\rho$ ) (kg/m <sup>3</sup> )	Factor de resistencia al vapor de agua ( $\mu$ )
Tierra aligerada D1	242,00	8,15
Tierra aligerada D2	291,00	7,21
Bloque de arcilla celulosa	584,87	10,84
Adobillo	1789,84	16,84

En la figura 1 se compara la conductividad térmica de diferentes materiales naturales obtenidos en publicaciones, normas, fichas técnicas y otras referencias.

Hay mucha variabilidad en los resultados obtenidos de los ensayos realizados a los mismos materiales. Se observa que la densidad es un factor determinante en la conductividad térmica de los materiales.

De todos los materiales ensayados, los que mejor desempeño térmico demostraron fueron las muestras de tierra aligerada que se quedaron en el límite de 0,1 W/m×k, que, si bien están lejos de valores de otros materiales industriales, es un buen resultado para considerar este material como elemento aislante.

También destaca el BAC con un 0,18 W/m×K. Este material es novedoso y se encuentra en fase experimental, por lo que sería interesante continuar realizando más ensayos con distintas dosificaciones para bajar la densidad aparente y con ello lograr obtener un resultado más favorable en su desempeño térmico.

Destaca el valor obtenido por el adobe, en sus dos densidades, que es mucho menor al que marca la NCh 853 (0,33 y 0,43 W/m×K frente a 0,9 W/m×K), por lo que está muy penalizado a la hora de realizar el diseño de la envolvente térmica.

Con respecto a los valores obtenidos de los revoques de tierra, se observa una fuerte variabilidad con relación a otros ensayos. Para revoque grueso se obtuvo 0,7253 W/m×K frente a 0,54 y 0,48 W/m×K; para revoque fino 0,5293 W/m×K frente a 0,25 y 0,29 W/m×K. Esta variabilidad puede ser debida a la propia composición de la tierra empleada o al

proceso de ejecución de las probetas.

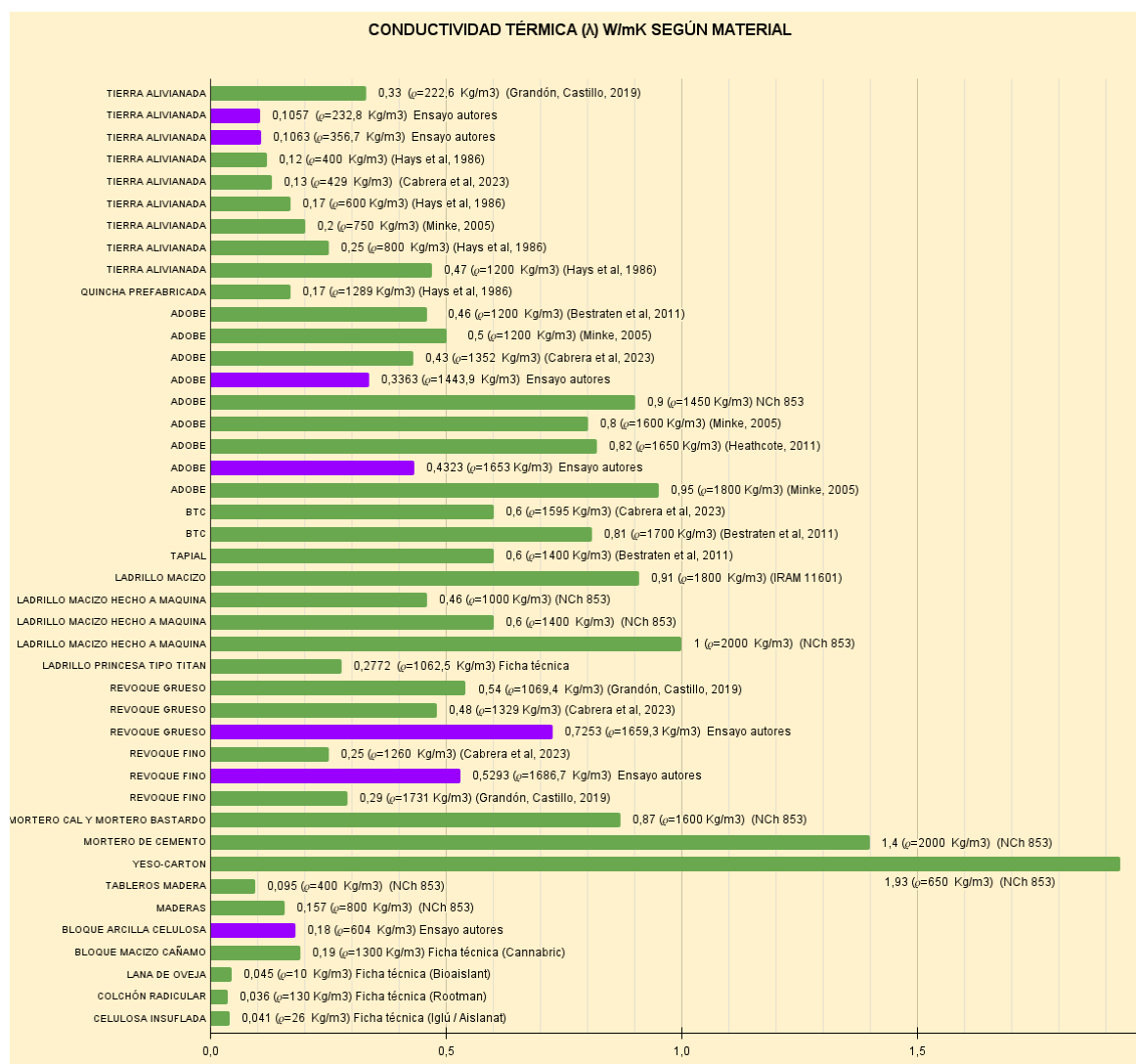


Figura 1. Conductividad térmica según material (en azul los resultados de los ensayos presentados en la tabla 2)

En la figura 2 se relacionan datos de conductividad térmica con la densidad aparente de distintos materiales naturales e industriales y se observa que la densidad aparente influye en gran medida en la conductividad térmica (Cabrera et al, 2023).

En la figura 3 se compara la permeabilidad al vapor de agua, concretamente el factor de resistencia a la difusión del vapor, de los materiales ensayados con otros resultados obtenidos en publicaciones, normas, fichas técnicas y otras referencias.

Se puede observar la diferencia de transpirabilidad entre los materiales naturales y los materiales industriales siendo estos últimos mucho más estancos, lo que dificulta la evacuación de humedades producidas en el interior de las construcciones, favoreciendo la aparición de condensaciones intersticiales, es decir, aquellas que se producen en el interior de los elementos constructivos entre las capas que los conforman. Los valores obtenidos en los materiales ensayados son similares a los valores vistos en otros materiales naturales ensayados en Chile como los realizados por Grandon y Castillo (2019) y por Ayensa et al. (2023). Por lo tanto, se puede afirmar que esta propiedad de los materiales naturales junto a su buen comportamiento higrotérmico favorece una buena calidad del aire interior de las edificaciones a la vez que evita daños producidos por humedades atrapadas en el interior de los elementos constructivos.

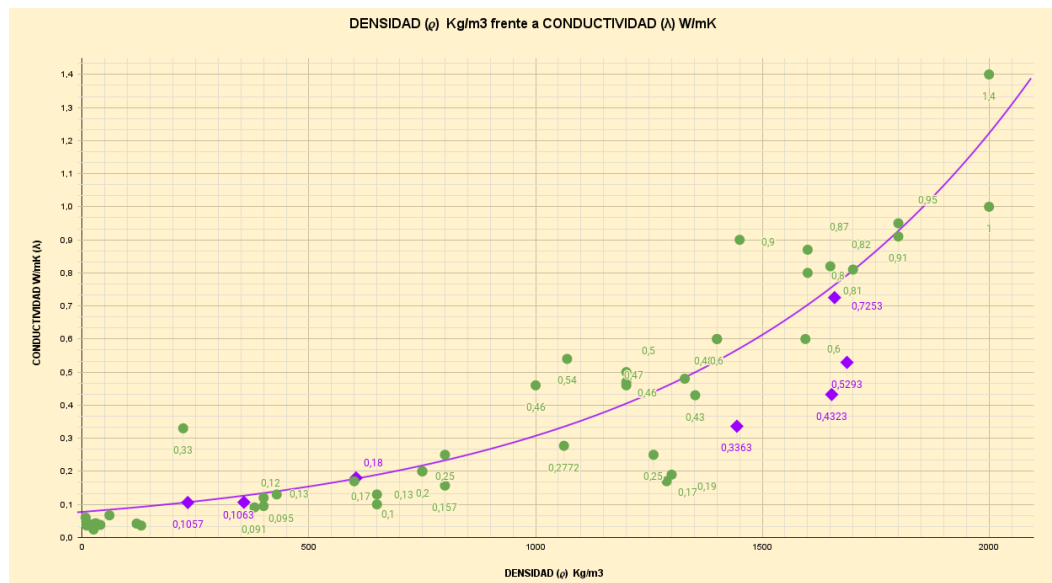


Figura 2. Conductividad térmica según densidad de material (en azul los resultados de los ensayos presentados en la tabla 2)

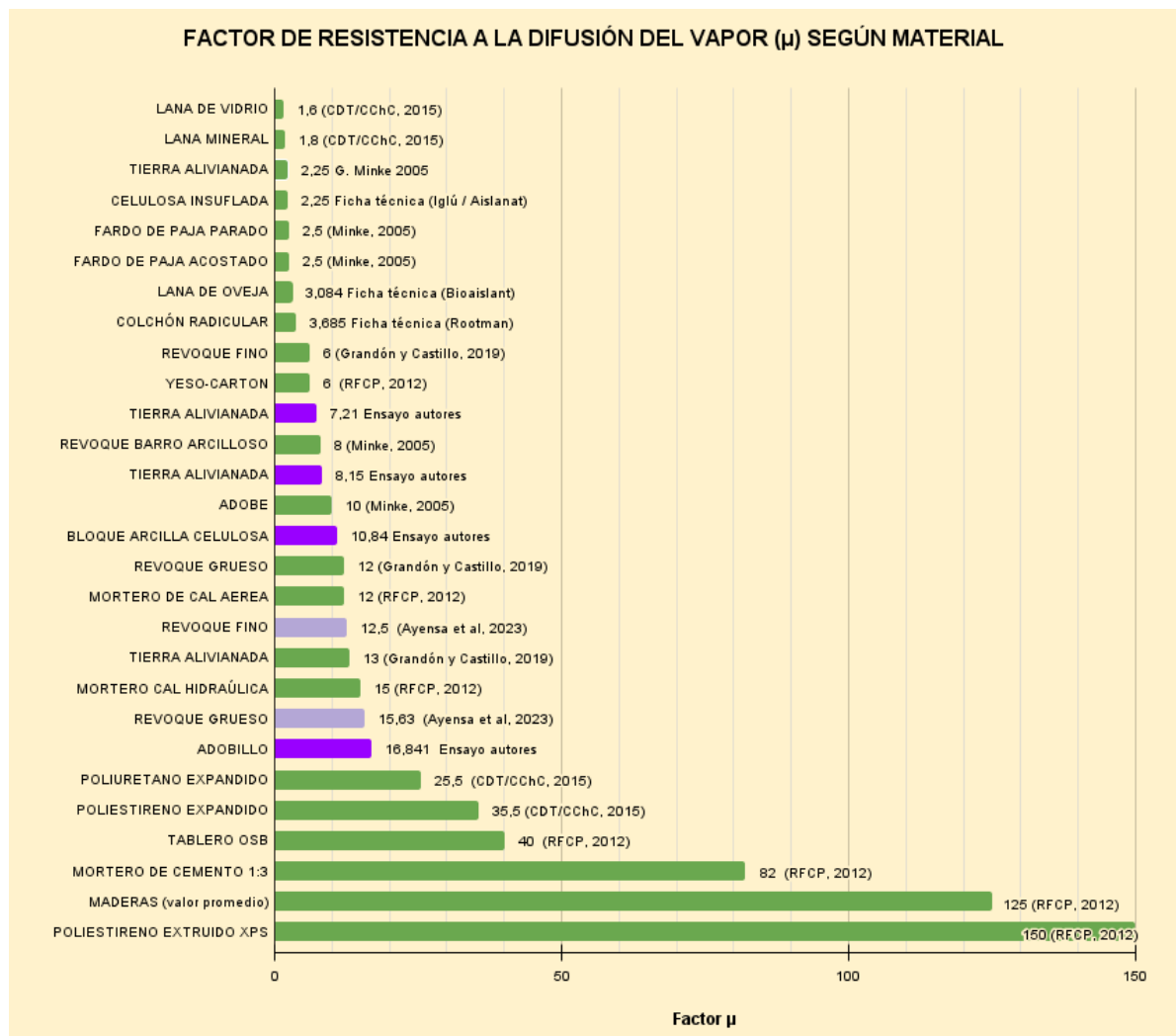


Figura 3. Factor de resistencia al vapor de agua según material (en azul los resultados de los ensayos presentados en la tabla 3)

En la figura 4 se analiza la transmitancia térmica (Valor U) de distintas soluciones constructivas de muros en base a materiales naturales frente a soluciones que aparecen en los listados del MINVU con los límites según la zona climática: 2,1 W/m<sup>2</sup>K (zona A), 0,8 W/m<sup>2</sup>K (zonas B-C-D); 0,6 W/m<sup>2</sup>K (zona E); y 0,45 W/m<sup>2</sup>K (zona F).

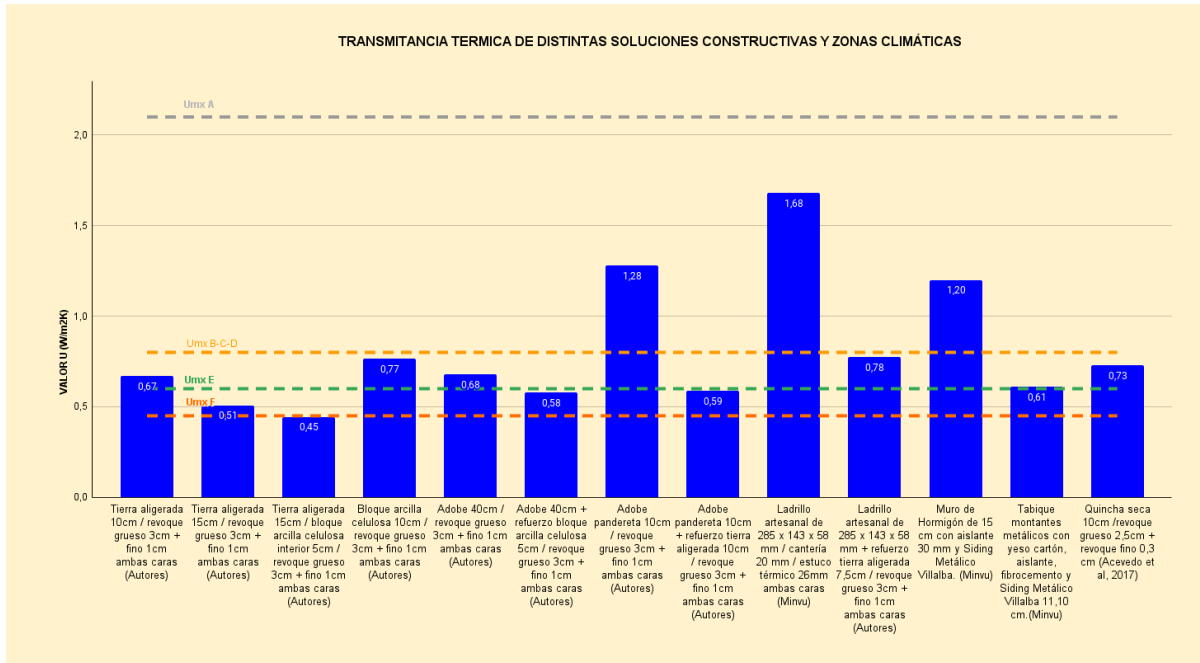


Figura 4. Transmitancia térmica de distintas soluciones constructivas

De este análisis se puede concluir que materiales como la tierra aligerada, al igual que la quincha seca, con un espesor relativamente pequeño cubre las necesidades de una gran parte del territorio chileno (zonas A a F). La solución de muro de adobe de 40 cm, con los datos obtenidos, permite cubrir hasta la zona climática D, mientras que con el dato la NCh 853 (2008), sólo cubriría la zona climática A. Esto permite abarcar toda la zona norte del país, llegando hasta buena parte de la VII región, exceptuando en todos casos la zona de cordillera.

El BAC es posible usarlo como relleno de aislación en espesores bajos (10 cm) abarcando hasta la zona climática D. Aunque es necesario hacer más pruebas y ensayos para intentar optimizar el material. Tanto el BAC como la tierra aligerada, pueden usarse como refuerzo en aislación en construcciones ya ejecutadas en base a materiales industriales, como por ejemplo vivienda social, que necesitarán de una futura rehabilitación energética en el contexto del plan de descarbonización en el que está inserto Chile.

Los revoques de tierra, si bien no alcanzan valores de aislación térmica (0,5293; 0,7253 W/m×K, considerando un material aislante por debajo de 0,1 W/m×K), aportan al total de la solución constructiva en base a su densidad, masa térmica y calor específico, ayudando a regular tanto la temperatura interior de la edificación, mediante su inercia térmica, como la humedad relativa interior en niveles más saludables para el ser humano (Minke, 2005).

#### 4 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en estos ensayos, sumados a otros estudios anteriores realizados en Chile, ayudan a completar datos para realizar los cálculos pertinentes a la hora de diseñar las envolventes edilicias y poder ofrecer a priori un desempeño acorde a la zona climática donde se desarrolle la edificación.

Los ensayos de permeabilidad al vapor de agua en materiales naturales son necesarios para complementar la información de comportamiento físico de los mismos y poder evaluar

teóricamente las soluciones constructivas frente al riesgo de condensaciones intersticiales que pueden suceder en ciertas zonas climáticas del país.

Los resultados obtenidos demuestran que los materiales con más fibra en su composición y menor densidad aparente tienen un desempeño térmico mayor y bien valorado; el adobe arroja resultados muy superiores a lo estipulado en la normativa actual. Si bien es complejo la normalización de este tipo de materiales debido a su heterogeneidad. A través de estos ensayos se espera poder llegar a un rango de valores que permitan realizar los cálculos pertinentes y poder cumplir con las necesidades higrotérmicas incluidas en la normativa del país.

Por todo ello, se puede asegurar que las soluciones constructivas en base a materiales naturales, como la tierra o la paja, o ambos, ofrecen un desempeño térmico eficaz y una buena transpirabilidad. Sumado a su bajo impacto medioambiental, estos materiales hacen un referente para el futuro de la industria de la construcción y rehabilitación energética.

Los ensayos realizados son un punto de partida para desarrollar más investigación acerca de materiales y soluciones constructivas en base a tierra y fibras con el fin último de que sean incluidos en los listados oficiales de materiales normados y así poder ser seleccionables para diseño y ejecución de viviendas sociales.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acevedo, R.; Carrillo, O.; Broughton, J. (2017) Construcción en quincha liviana. Sistemas constructivos sustentables de interpretación patrimonial. Ministerio de vivienda y urbanismo, Chile.

Ayensa, D.; Gallardo, M.; Conde, I. (2023) Permeabilidad al vapor de agua para revestimientos de tierra. 21º Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra. Memorias. Bogotá/Tibasosa, Colombia. PROTERRA. p. 277-286.

Bestraten, S., Hormias, E., Altemir, A. (2011). Construcción con tierra en el siglo XXI. Informes de la Construcción, 63(523): 5-20

Cabrera, S.; Guillarducci, A.; González, D.; Suárez, M. (2023). Evaluación del coeficiente de conductividad y transmitancia térmica de elementos constructivos de tierra. Revista Hábitat Sustentable Vol. 13, N° 1. p. 8 -19

Colección FAO Capacitación (sf). Métodos sencillos para la acuicultura, sección suelo. Disponible en [https://www.fao.org/fishery/static/FAO\\_Training/FAO\\_Training/General/x6706s/Index.htm](https://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/Index.htm)

Colonelli, P.; Guevara, J.; Blender, M.; Yáñez, P. (2015) Manual de acondicionamiento térmico. Criterios de intervención. Corporación de desarrollo tecnológico. Cámara chilena de la construcción. Chile.

Cuitiño, M.; Rotondaro, R.; Esteves, A. (2020). Análisis comparativo de aspectos térmicos y resistencias mecánicas de los materiales los elementos de la construcción con tierra. Revista de Arquitectura (Bogotá), 22(1), 138-151. Doi: <http://dx.doi.org/10.14718/RevArq.2020.2348>.

Dávila, V.; Contreras, J. (2020) El adobillo. Cultura constructiva de Valparaíso. Ministerio de las Culturas, las Artes y el Patrimonio Línea de Patrimonio Cultura

Grandón, C.; Castillo, J. (2019) Ensayo de permeabilidad al paso de vapor en muros de quincha liviana húmeda. Análisis a revoques finos de tierra con aditivos naturales. Seminario de investigación concepción, 2019, Universidad del Bio-Bio Facultad de Arquitectura.

Hays, A.; Matuk, S.; Vitoux, F. (1986) Técnicas mixtas de construcción con tierra, CraTerre.

Heathcote, K. (2011). The thermal performance of earth buildings. Informes de la Construcción, Vol. 63, 523, 117-126. doi: 10.3989/ic.10.024

IRAM 11601 (2002) Aislamiento térmico de edificios. Métodos de cálculo. Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario. Argentina: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.

McHenry, P. (1996). Adobe, cómo construir fácilmente. Editorial Trillas, México.

Minke, G. (2005) Manual de construcción en tierra. La tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual. Editorial Fin de Siglo, Uruguay.

NCh 850 (2008). Aislación térmica - Método para la determinación de la conductividad térmica en estado estacionario por medio del anillo de guarda. Chile: Instituto Nacional de Normalización.

NCh 853 (2008). Componentes y elementos para edificación - Resistencia térmica y transmitancia térmica - Métodos de cálculo. Chile: Instituto Nacional de Normalización.

NCh 2457 (2014). Prestaciones higrotérmicas de los productos y materiales para edificios - Determinación de las propiedades de transmisión de vapor de agua. Chile: Instituto Nacional de Normalización.

Neves, C.; Faria, O.; Rotondaro, R.; Cevallos, P.; Hoffmann, M. (2010) Selección de suelos y métodos de control en la construcción con tierra - prácticas de campo. Red PROTERRA. Disponible en <http://www.redproterra.org>.

Norma E.080 (2017). Diseño y construcción con tierra reforzada. Perú: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Disponible en: <https://www.sencico.gob.pe/descargar.php?idFile=3478>

RFCP (2016). Reglas de profesionales de construcción con paja. Red de construcción con paja. Barcelona: Icaria editorial. p.151-152

Rodríguez Stuardo, P. A. (2016). Caracterización geomecánica y mineralógica del maicillo en la Cordillera de Nahuelbuta. Universidad Católica de la Santísima Concepción.

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan su agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de alguna manera en la realización de los ensayos: Diana Ayensa, Claudia Aracena, Marcela Gallardo, Julio Pérez, Sergio Matthies, Sonia Asensi, Juan Fonseca, Luis Cerpa, Rodrigo Barrios, Anselmo Magaña, Víctor Águila y Jorge Broughton. Asimismo, queremos agradecer a Camilo Lanata por ofrecernos la oportunidad de ensayar materiales naturales a través de la DITEC.

## **AUTORES**

Ignacio Conde Bueno, licenciado arquitecto por la Universidad Alfonso X el sabio, bioconstructor, carpintero, estucador, socio fundador del proyecto de construcción natural TramaLar, vicepresidente de la asociación gremial Gremio de Bioconstrucción de Chile. Curriculum completo en [https://drive.google.com/file/d/1QYrND619Ty\\_2uf62pgWAcagaeUqZqdEK/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1QYrND619Ty_2uf62pgWAcagaeUqZqdEK/view?usp=sharing)

Daniele Santavicca, maestro en gestión integral de proyectos de bioconstrucción, graduado en edificación por la Universidad de Granada (España), socio encargado del área técnica y labores de carpintería de Cooperativa PANAL (cooperativa dedicada a la ejecución de proyectos de bioconstrucción), socio representante de la comisión de investigación y normativa del Gremio de Bioconstrucción de Chile.

Sebastián Gutiérrez, carpintero y albañil en tierra, creador de Mulch Oficios, miembro del Gremio de Bioconstrucción de Chile.