



**PROYECTO DE VIVIENDA BAJO EL ESTÁNDAR
PASSIVHAUS EN CHILE**

Proyecto de Título para optar al Título de Constructor Civil

Estudiante:
Gabriel Pérez Brain

Profesor guía:
José Ignacio Torres Barón

Diciembre 2018
Santiago, Chile



**PROYECTO DE VIVIENDA BAJO EL ESTÁNDAR
PASSIVHAUS EN CHILE**

Proyecto de Título para optar al Título de Constructor Civil

Estudiante:
Gabriel Pérez Brain

Profesor guía:
José Ignacio Torres Barón

Diciembre 2018
Santiago, Chile

Resumen

Este Proyecto de Título es una guía para saber todo lo necesario sobre el estándar Passivhaus y su aplicación en Chile.

Incluye la definición del concepto “Passivhaus” o Vivienda Pasiva y su historia, además de que es lo que está ocurriendo en la actualidad en relación al estándar y cuáles son los entes que lo regulan. Luego se explica detalladamente en que consiste el estándar Passivhaus y todas sus normativas y criterios.

Son 5 los principios básicos que se deben seguir al pie de la letra si se quiere edificar bajo el estándar, y éstos se detallan en profundidad en esta investigación, dejando claras todas sus etapas.

En esta investigación también se muestran todas las tecnologías que se asocian al concepto de vivienda pasiva, como las tecnologías de aislamiento térmica, de ventanas altamente aislantes y de sistemas de calefacción, ventilación y producción de agua caliente sanitaria.

También se estudia el área arquitectónica del estándar, mostrando de que se tratan los principios de diseño pasivo y el uso pasivo de la energía solar en cuanto al diseño de la edificación.

Por otra parte, esta investigación muestra todo el contexto legal de Chile en relación a lo que el estándar Passivhaus plantea, como las normativas térmicas de edificación, normativas sobre ventilación entre otras. Luego relaciona esta normativa chilena con la normativa del estándar y deja claro que es lo que se debe cumplir para construir en Chile bajo el estándar.

Finalmente se plantea un proyecto de vivienda hipotético que se rige bajo la normativa del estándar para las condiciones climáticas de Santiago de Chile. Se explica paso a paso como se cumplieron los principios del estándar Passivhaus y se añade un análisis de costos con un estudio de mercado, determinando así cual es la real cabida de un proyecto de este tipo en Chile.

Summary

This Degree Project is a guide to know everything there is to know about the Passivhaus Standard and his application in Chile.

It includes the definition of the “Passivhaus” concept (or Passive House), his history, what is happening now in relation to the standard and which are the entities that regulates it. What follows is a detailed explanation of what is the Passivhaus standard, his regulations and all of his criteria.

Five are the basic principles that have to be followed to the letter if the intention is to build under the standard. These five principles are profoundly detailed in this investigation, leaving no doubt about the standard stages.

This investigation also show every technology that can be associated to the passive house concept, like the insulation technologies, the highly insulated windows and the heating, ventilation and hot water systems.

The architectural area of the standard is also studied, showing what are the passive design principles and the passive use of the solar energy concerning the building design process.

On the other hand, this investigation shows the legal context of Chile in relation to what the standard poses, like the thermic and ventilation regulations, among others. Then, using both the Chilean and the Passivhaus standard regulations, what is needed to build in Chile under the standard is made clear.

Finally, a hypothetical house project is created; this project is governed by the standard regulations for the climate conditions of Santiago de Chile. Gradually it is explained how the principles of the Passivhaus standard are fulfilled and a cost analysis alongside with a market study are created to determine which is the real place for a project like this in Chile.

Índice

Introducción	1
1. Información y antecedentes generales	2
1.1. El concepto de vivienda pasiva	2
1.2. Historia de la vivienda pasiva.....	3
1.3. La vivienda pasiva en la actualidad.....	6
1.3.1. Passive House Institute (PHI).....	6
1.3.2. International Passive House Association (iPHa).....	6
1.3.3. Situación Global del estándar Passivhaus.	6
2. El estándar Passivhaus, qué es y cómo se logra	8
2.1. Normativa del estándar de vivienda pasiva	8
2.1.1. Resumen de los criterios del estándar.....	8
2.2. Los cinco principios de la vivienda pasiva.....	10
2.3. Envolvente aislada térmicamente	10
2.3.1. Definiciones de envolvente y de transmitancia térmica.	10
2.3.2. Envolvente aislada térmicamente.	11
2.3.3. Materiales Aislantes.	12
2.4. Envolvente hermética	12
2.4.1. Las etapas del sellado hermético.	14
2.4.2. Requisitos asociados.....	15
2.5. Diseño libre de puentes térmicos.....	16
2.5.1. Definición de Puente térmico.	16
2.5.2. Efectos de los puentes térmicos.....	17
2.5.3. Diseño libre de puentes térmicos.....	18
2.6. Ventanas y puertas pasivas	19
2.7. Ventilación con recuperación de energía térmica.....	21
2.7.1. Ventilación.	21
2.7.2. La recuperación de la energía térmica.	23
2.7.3. Unidad compacta de bomba de calor.....	24
2.7.4. Dónde conseguir un sistema HVAC.....	27
2.8. Otros principios pasivos del estándar	27
2.8.1. Sombras y uso pasivo de la energía solar.	27
2.8.2. Diseño de edificaciones compactas.	28
3. Contexto legal y técnico para la aplicación del estándar Passivhaus en Chile.....	29
3.1. Contexto histórico de la normativa térmica chilena	29
3.2. Artículo 4.1.10, OGUC, acondicionamiento térmico de viviendas.....	30
3.2.1. Exigencias de acondicionamiento térmico de la envolvente.	30
3.2.2. Exigencias sobre la superficie máxima de ventanas.....	33
3.3. Normativas relacionadas a la ventilación	35
3.3.1. Artículo 4.1.2., OGUC.	35
3.3.2. Artículo 4.1.3., OGUC.	35
3.3.3. Artículo 4.1.4., OGUC.	35
3.4. Aplicación del estándar Passivhaus en Chile	36

3.4.1.	Exigencias para el clima Cálido/Templado.....	36
3.4.2.	El estándar Passivhaus frente a la normativa chilena.....	36
4.	Proyecto de vivienda bajo el estándar Passivhaus en Chile.....	39
4.1.	Parámetros de diseño.....	39
4.1.1.	Diseño Compacto.....	45
4.1.2.	Uso pasivo de la energía solar.....	45
4.2.	Sistema Constructivo.....	47
4.2.1.	Aplicación del principio de envolvente térmica.....	47
4.2.2.	Aplicación del principio de envolvente hermética.....	50
4.2.3.	Diseño libre de puentes térmicos y unión con ventanas DVH.....	52
4.2.4.	Aplicación del principio de ventanas y puertas pasivas.....	54
4.2.5.	Aplicación del principio de ventilación con recuperación de energía.....	55
4.2.6.	Esquema de edificación.....	55
4.3.	Calificación energética de viviendas.....	60
4.4.	Análisis de costos.....	61
4.5.	Estudio de mercado.....	63
4.6.	Valor económico añadido del estándar Passivhaus.....	64
5.	Conclusiones.....	66
	Referencias.....	67
	Anexos.....	69
	Anexo 1, Artículo 4.1.10. OGUC.....	69
	Anexo 2, Mapas de Zonificación climática del MINVU.....	76
	Anexo 3, Artículo 4.1.2. OGUC.....	92
	Anexo 4, Artículo 4.1.3. OGUC.....	92
	Anexo 5, Artículo 4.1.4. OGUC.....	92

Introducción

¿Qué es el estándar Passivhaus?

Es la primera pregunta que esta investigación pretende responder, la idea general es que después de leer este proyecto de título no quede ninguna duda sobre el estándar constructivo con más bajo consumo energético del mundo.

¿Es posible construir una vivienda bajo el estándar Passivhaus con los materiales, conocimientos y tecnologías disponibles en Chile?

Esa es la segunda pregunta que se quiere responder. En este proyecto de título se pretende determinar qué tan factible es la generación de proyectos de edificación bajo el estándar Passivhaus en Chile y esclarecer también si tenemos los medios necesarios para lograrlo.

¿Cuáles son los beneficios del estándar?, ¿Para qué sirve una vivienda Passivhaus?

Todas estas preguntas son absolutamente necesarias si se quiere aprender sobre el estándar, se pretende dejar claro todos sus beneficios y utilidades además de determinar cuáles son las diferencias con una edificación común y si son o no fáciles de lograr.

SOLO USO ACADÉMICO

1. Información y antecedentes generales

1.1. El concepto de vivienda pasiva

El concepto “Vivienda Pasiva” o “Passivhaus” en alemán, se refiere a una edificación que logra el confort térmico humano utilizando métodos “pasivos”, es decir, métodos fijos o estáticos, perdurables en el tiempo que funcionan por si solos sin el uso de energía o una intervención activa humana. Pero eso es únicamente a lo que el concepto “pasivo” se refiere, porque en la realidad es prácticamente imposible lograr el confort térmico humano sin algún tipo de gasto energético.

La idea general es que permite construir viviendas que son energéticamente eficientes a un nivel en el que casi no es necesario ningún tipo de gasto energético. Éste es un concepto que fue descubierto más que inventado, ya que en zonas donde la temperatura ambiente es idónea para el confort humano (Ej. en algunas partes de Irán, las costas de Portugal, algunas partes del sur de China, Bogotá en Colombia, entre otros), toda vivienda que haya sido construida razonablemente no necesita ningún tipo de calefacción o de refrigeración activa, por ende, son viviendas pasivas, solo que no se conocen como tales. El caso ejemplar de lo recientemente planteado son las viviendas tradicionales del sur de China (ver Imagen 1), donde el clima es casi perfecto para el confort humano, ahí, más que calentar sus viviendas, necesitan enfriarlas, por lo que instintivamente se han construido desde siempre viviendas que se protegen del sol (y de la lluvia) y que permiten la salida del aire caliente por puntos ubicados estratégicamente en las zonas altas de las edificaciones. Estas viviendas pueden llamarse pasivas, porque



Imagen 1, Templo en Fozhou, China. Zhu Difeng.

logran mantener la temperatura interior al nivel del confort humano sin utilizar energía activa, pero es el clima natural el que está haciendo la mayor parte del trabajo, por lo tanto es un sistema que funciona únicamente en ese tipo de climas y no pueden utilizarse como ejemplos para aplicarse en otras partes del mundo (Passive House Institute, 2014-2018).

El estándar Passivhaus es un concepto fundamental, es algo que se puede lograr de muchas formas, no existe un método único de construcción para este concepto, sino que cualquier sistema constructivo puede modificarse para construir una edificación que una vez terminada va a ser una vivienda pasiva, y esta edificación va a tener dos grandes ventajas frente a una vivienda común; su interior estará todo el año, día y noche, a una temperatura perfecta para el confort humano y a un costo energético prácticamente insignificante.

1.2. Historia de la vivienda pasiva

Existen referencias históricas de la construcción de viviendas pasivas en zonas donde el clima no es el ideal para el confort humano, por ejemplo, en Islandia, que tiene un clima de muy bajas temperaturas, en los siglos XVII y XVIII, se construyeron las conocidas “Turf Houses” (ver Imagen 2), viviendas muy aisladas térmicamente con techos de pasto vivo y semi-enterradas en la tierra. Esto ocurrió porque en la misma fecha, en toda Europa, debido a la extensa deforestación, tuvo lugar la conocida crisis de la madera, casi no había madera en ninguna parte, la poca que había la utilizaban los nobles para construcciones y leña, esto dio paso a la explotación del carbón mineral para



Imagen 2, Antiguas Turf Houses, Islandia. Kate Buló, 2017

calentar viviendas en toda Europa, pero en el caso de Islandia, simplemente no se explotaba el carbón y tampoco llegaba hasta ahí. Así, y porque la necesidad es la madre de la invención, los islandeses se vieron obligados a buscar formas de construir que les permitieran mantener sus viviendas templadas sin la necesidad de utilizar fuego, entonces fueron descubriendo que la tierra con pasto verde o seco proporcionaba una gran aislación térmica, y de esta forma nacen las Turf Houses. Ahora, si estas viviendas hubiesen tenido las ventanas adecuadas, y contado con un sistema de ventilación activa, quizás hubiesen sido las primeras viviendas pasivas de la historia, pero aun así, no estaban tan lejos, ya que cientos de personas lograron sobrevivir al frío islandés durante siglos sin calefaccionar sus viviendas de ninguna manera (Passive House Institute, 2014-2018).

Hasta finales del siglo XX, no hubo gran avance en el tema. Por toda Europa, en especial en zonas nórdicas, si se construyó instintivamente, al igual que en el caso islandés, con materiales naturalmente aislantes, básicamente con gruesos muros de paja que abrigaban las viviendas, pero era inevitable que se utilizaran fogones o chimeneas de todo tipo para calentarse, porque los inviernos eran extremadamente fríos y no tenían las tecnologías necesarias para sellar por completo sus viviendas. Si hay un caso particular digno de mención, éste es el caso del buque de investigación polar llamado "Fram" (ver Imagen 3), propiedad del científico, explorador y diplomático noruego Fridtjof Nansen. En 1893, Nansen encargó la construcción del Fram al arquitecto naval noruego Colin Archer, quien diseñó y construyó el buque especialmente para resistir las inclemencias del clima ártico, ya que éste iba a ser utilizado para la que posteriormente se conoció como una de las expediciones más importantes del océano glacial ártico. El Fram no solo estaba equipado para resistir estructuralmente las fuertes presiones de los hielos árticos, sino que también poseía un avanzado equipamiento térmico para proteger



Imagen 3, Buque de exploración "Fram", capturado por hielos árticos. Autor desconocido, 1896

a sus tripulantes de las temperaturas extremadamente bajas del ártico, que llegaron en enero de 1896, hasta los -52° Celsius. Sobre el Fram, Nansen (1898) afirma:

(...) los muros laterales del buque fueron forrados con fieltro alquitranado, después vino un espacio relleno de corcho, luego un panel de separación, al que le siguió una gruesa capa de fieltro, a continuación, una capa de linóleo hermético al aire, y, por último, un panel de madera interior. El cielo del salón y las cabinas, con una configuración similar, (...) tiene un grosor de 15 pulgadas (...). El tragaluz, que era lo más expuesto al frío, fue protegido por 3 paneles de vidrio, uno dentro del otro (...). (p.70)

El Fram es una morada cómoda. Si el termómetro marca 22° sobre el 0, o 22° por debajo, no tenemos ningún fuego en la estufa. La ventilación es excelente, especialmente desde que montamos la vela de aire, que envía todo el frío del invierno a través del ventilador, pero a pesar de esto, nos sentamos aquí cálidos y cómodos, sólo con una lámpara encendida. Estoy pensando en mandar a sacar la estufa por completo; no es más que una molestia en el camino. (p.317)

En las décadas de 1970 y 1980 se construyeron, principalmente en Suecia, Dinamarca y Alemania, muchos edificios que querían ser lo que hoy se conoce como viviendas pasivas, solo que debido al desconocimiento de las tecnologías de vidrioado hermético (doble o triple) y también a que no le dieron la importancia necesaria a sellar las filtraciones en la envolvente, no se lograron a cabalidad, pero sí lograron que fuesen viviendas de muy bajo consumo energético.

Es recién en 1990 que el ingeniero en construcción Bo Adamson clasifica este tipo de viviendas como viviendas pasivas. No mucho después, en 1991, el físico alemán Dr. Wolfgang Feist, director y fundador del “Passive House Institute”, junto con Bo Adamson y otros, construyen la primera real vivienda pasiva en la ciudad de Darmstadt, Alemania. Este edificio de 4 departamentos (ver Imagen 4), aún mantiene los estándares Passivhaus y se ha transformado en un ícono del concepto Passivhaus a nivel global.



Imagen 4, La primera Passivhaus propiamente tal. Darmstadt, Alemania. Passivhaus Institut

1.3. La vivienda pasiva en la actualidad

Hoy en día existen dos entes que regulan el estándar, están activamente relacionados entre sí, estos son:

1.3.1. Passive House Institute (PHI).

Fundado por el Dr. Wolfgang Feist en 1996 con el propósito de establecer la normativa relacionada al estándar Passivhaus, además de liderar en la investigación de nuevos conceptos constructivos, materialidades, herramientas de planificación y aseguración de la calidad de estas edificaciones energéticamente eficientes.

1.3.2. International Passive House Association (iPHa).

Es una plataforma creada por el PHI con el propósito de promover el estándar Passivhaus a nivel global, esta asociación permite membresía a cualquier persona del mundo, su máximo propósito es informar y establecer conexiones entre profesionales interesados.

1.3.3. Situación Global del estándar Passivhaus.

En las últimas dos décadas, el concepto de viviendas pasivas se ha extendido por todo el mundo, pero especialmente en Alemania, Holanda, los Países Nórdicos y China. No se sabe a ciencia cierta cuantas viviendas se han construido bajo éste concepto ya que muchísimos arquitectos y constructores alrededor del mundo pueden haber construido viviendas pasivas sin dar a conocer sus proyectos, pero la iPHa estima que son más de 60.000 las edificaciones residenciales y no residenciales que se han construido bajo este concepto, y de éstas, más de 18.500 han sido certificadas bajo los estrictos criterios de certificación del PHI, además, varios cientos están siendo monitoreadas empíricamente y testeadas rigurosamente por la iPHa. Los resultados han sido constantemente positivos (International Passive House Association, 2010-2018).

En septiembre del 2018, se terminó la construcción del edificio más alto construido bajo el estándar Passivhaus en el mundo. Ubicado en el distrito de Bolueta, en la ciudad de Bilbao, España, se construyó este edificio de 32 pisos llamado, al igual que el distrito donde se ubica, “Edificio Bolueta” (ver Imagen 5). Con 88 metros de altura y 108 departamentos habitacionales, este edificio estableció un nuevo récord para el estándar Passivhaus a nivel global (Krämer, High-rise Bolueta ranks first, 2018).

En China no se quedan atrás, ya que, en la ciudad de Gaobeidian, actualmente se está construyendo el complejo habitacional más grande del mundo bajo el estándar Passivhaus, con 30 rascacielos habitacionales, múltiples casas unifamiliares, salas cuna, un colegio, estación de bomberos, un centro comercial y un cine, todos éstos construidos bajo el estándar Passivhaus. Este complejo, supervisado por el Dr. Berthold Kaufmann que es el encargado de las edificaciones Passivhaus en China, se llama “Bahnstadt

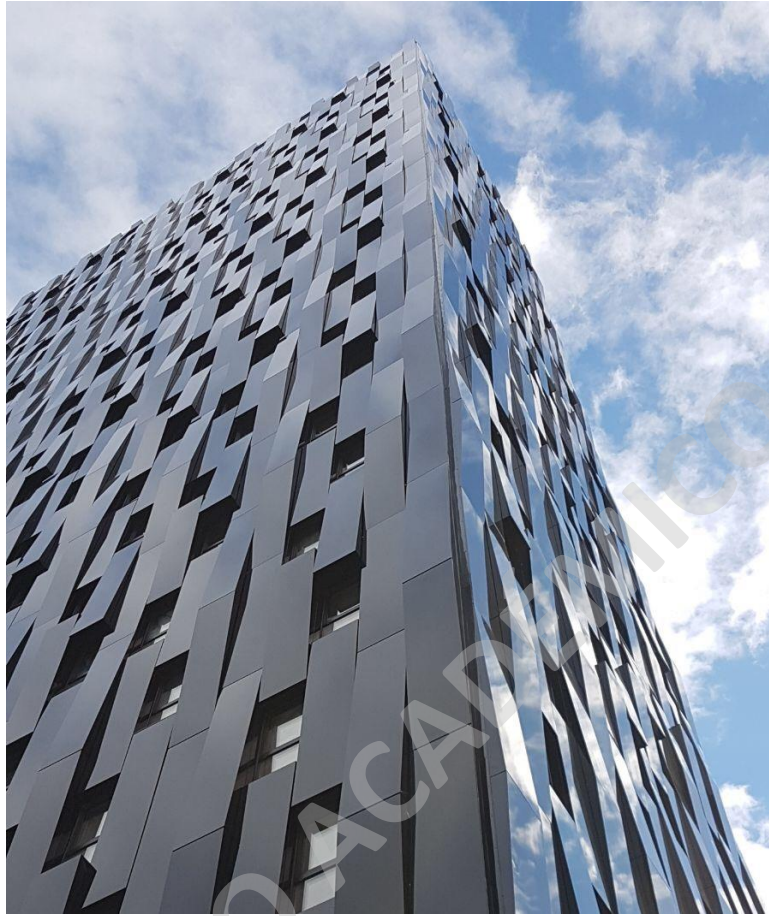


Imagen 5, Rascacielos Bolueta, el edificio más alto del mundo bajo el estándar Passivhaus. (Krämer, 2018)

Gaobeidian” y está basado en otro complejo habitacional, llamado “Bahnstadt Heidelberg”, construido y diseñado en Heidelberg, Alemania. El Bahnstadt Gaobeidian tendrá una superficie habitable de más de un millón de metros cuadrados, rompiendo así otro récord para el estándar Passivhaus a nivel global (Krämer, China commits to climate protection, 2018).

Así, muchos otros edificios importantes se están construyendo en el mundo bajo el estándar Passivhaus. En Chile, por ejemplo, se anunció recientemente la futura construcción de un edificio bajo este estándar, será un edificio residencial ubicado en la comuna de Ñuñoa, construido por la inmobiliaria Urbes, y que con un presupuesto de aproximadamente US\$ 20 millones, será el primer edificio Passivhaus de Chile y Latinoamérica. Además, en los próximos 3 años, la misma inmobiliaria prevé desarrollar otras 5 iniciativas de la misma índole, con un presupuesto de US\$ 90 millones. (Pulso, 2018).

2. El estándar Passivhaus, qué es y cómo se logra

2.1. Normativa del estándar de vivienda pasiva

Una vivienda pasiva o Passivhaus, para ser denominada como tal, debe pasar por una certificación oficial establecida por el PHI mediante algún profesional que esté acreditado para certificar, de estos profesionales que realizan dichas certificaciones hay en algunas ciudades del mundo. En Santiago de Chile existe una empresa que trabaja con profesionales acreditados solo para diseñar, pero que además gestionan la certificación mediante otros profesionales que si están acreditados para certificar. La empresa se llama “Arquiambiente Ltda.” Y es la única en Chile que gestiona certificaciones del estándar Passivhaus (Passive House Institute, 1996-2018).

Para poder certificar sus edificaciones, los usuarios, arquitectos, ingenieros o constructores deben seguir lo establecido en un documento específico entregado por el PHI llamado “Criteria for the Passive House, EnerPHit and PHI Low Energy Building Standard”, en español: “Criterios para la Vivienda Pasiva, EnerPHit y el Estándar de edificios de bajo consumo del PHI”. En este documento, se encuentran todas las normas que el estándar requiere para que una edificación pueda ser certificada como Passivhaus.

Por otra parte, el PHI también proporciona una herramienta llamada “Passive House planning package” (PHPP), en español: “Paquete de planificación para las viviendas pasivas”. Ésta es una herramienta digital basada en Microsoft Excel que permite planear en su totalidad la edificación, en ella, el usuario ingresa datos como la ubicación geográfica, las propiedades de transmitancia térmica de los materiales que se utilizarán, la configuración y espesor de los muros, techos y pisos, propiedades de las ventanas, etc., y a esos datos, el PHPP responde, entre otras cosas, con datos numéricos de consumos energéticos anuales y, por ende, da a conocer si el proyecto entra en el estándar o no.

2.1.1. Resumen de los criterios del estándar.¹

La norma más relevante y que es la que básicamente define el estándar Passivhaus es la que dice que en una edificación, para que esté dentro del estándar Passivhaus, debe utilizar menos de 15kWh (1.5 litros de combustible o 1.5 m³ de gas) para calentar, o enfriar, un metro cuadrado habitable al año. Es decir, si una edificación tiene 100 m² de superficie interior habitable, ésta no debe consumir más de 150 kWh en un año para efectos de calefacción y/o enfriamiento del ambiente.

¹ Toda la información dispuesta bajo este título se basa en el documento: “Criteria for the Passive House, EnerPHit and PHI Low Energy Building Standard” (Passive House Institute, 2016).

En cuanto a la humedad del ambiente interior, el estándar permite un gasto energético extra para deshumidificar el ambiente si es que es necesario, esto es calculado por el PHPP al ingresarle datos sobre la temperatura y la humedad relativa del ambiente donde está ubicada la edificación.

En cuanto al sellado hermético, el estándar Passivhaus exige que la edificación debe estar sellada hermética al aire al nivel de obtener un valor N_{50} máximo de 0.6 h^{-1} en la prueba de presurización “Blower door test”. Esta norma será explicada en detalle más adelante.

Otra norma establece que el consumo de energía primaria (que incluye: calefacción/refrigeración, deshumidificación, agua caliente domiciliaria, iluminación, electricidad auxiliar y electrodomésticos), sea en su totalidad en base a energías renovables. Para estos consumos, el estándar establece limitaciones, ofreciendo 3 calificaciones distintas: la calificación “clásica”; que permite un consumo máximo de 60 kWh/m² al año, la calificación “Plus”; que permite un consumo máximo de 45 kWh/m² al año, y la calificación “Premium”; que permite un consumo máximo de 30 kWh/m² al año. El estándar establece que no es necesario que esa energía sea generada en el mismo lugar de la edificación (sobre ese tema trata la siguiente y última norma), sino que puede ser proporcionada por compañías que producen energía renovable, como parques eólicos, parques solares u otros. Ahora, sobre esta norma es necesario hacer una acotación; antes del año 2015, el estándar Passivhaus no exigía esta norma, sino que exigía un consumo máximo de 120 kWh/m² al año de energía, y el origen de esta energía no tenía que ser necesariamente renovable, esto cambió por que en Europa las fuentes de energías renovables han aumentado considerablemente y para un usuario europeo común, no es difícil conseguir proveedores de energías renovables. Esto no es el caso de Chile, por lo que probablemente el PHI tienda a ser flexible en esta norma para casos de edificaciones fuera de Europa, sobre esto, el PHI en su documento de criterios de construcción para el estándar de vivienda pasiva afirma:

Los requisitos de demanda de energía primaria renovable (PER), (...) fueron introducidos por primera vez en el año 2015. Como una alternativa a este criterio, y para el estándar de vivienda pasiva clásico, se puede entregar evidencia, en una etapa transitoria, de que se cumple con el requisito anterior de demanda de energía primaria no renovable (PE) de $Q_p \leq 120 \text{ kWh/m}^2$ al año. el PHI puede especificar distintos valores nacionales basándose en los factores nacionales de energía primaria (...). (Passive House Institute, 2016, pág. 5)

Por último, el estándar propone una generación autónoma de energía renovable que puede ser generada por dispositivos adosados a la edificación o no directamente adosados. Se divide en las mismas 3 categorías: para conseguir la certificación “Clásica” no se requiere generación de energía renovable, para la certificación “Plus” se requiere una generación de 60 kWh/m² al año, y para la certificación “Premium” se requiere una generación de 120 kWh/m² al año.

2.2. Los cinco principios de la vivienda pasiva

Con el fin de mantener el confort térmico deseado, el concepto de vivienda pasiva utiliza variadas técnicas, de las cuales destacan cinco principios, estos son:

1. Envoltente aislada térmicamente.
2. Envoltente hermética.
3. Diseño libre de puentes térmicos.
4. Ventanas y puertas pasivas.
5. Ventilación con recuperación de energía térmica.

2.3. Envoltente aislada térmicamente

2.3.1. Definiciones de envoltente y de transmitancia térmica.

La envoltente de una edificación consiste en todos los elementos, ya sea muro, piso y cielo que separan el interior de una vivienda con el exterior. El ambiente exterior de la vivienda es controlado por la naturaleza y bien puede ser un ambiente de bajas temperaturas, de temperatura media, o un ambiente con temperaturas altas. Mientras que, al interior, lo que una vivienda pasiva pretende, es mantener la temperatura constantemente en 21° Celsius, que es la temperatura de confort humano. Esto no es fácil ya que todos los materiales tienen una conductividad térmica inherente (U), hay unos que conducen la temperatura mucho más que otros (ver Tabla 1), pero finalmente

Tabla 1
Conductividad Térmica de materiales de construcción

Material	Conductividad Térmica [W/mK]
Concreto reforzado	2.30
Ladrillo sólido	0.80
Ladrillo perforado	0.40
Maderas blandas (Pino Radiata)	0.13
Concreto aireado	0.11
Fardos de paja	0.055
Material aislante común	0.040
Material aislante de alta calidad	0.025
Material aislante con Nanoporos	0.015
Material aislante al vacio (Silica)	0.008
Material aislante al vacio (alta calidad)	0.002

La información presentada en esta tabla proviene de la página web de la Passive house Institute, (Passive House Institute, 1996-2018).

todos transmiten energía térmica desde el lado de mayor temperatura al de menor hasta lograr un equilibrio (Instituto Nacional de Normalización, 1987). Por ejemplo, si en los meses de invierno la temperatura exterior es de 5° Celsius y la interior es de 21° C., la energía térmica va a fluir desde el interior hasta el exterior, y a no ser que la temperatura interior sea restaurada de alguna forma, ésta va a bajar hasta que en ambos lados la temperatura sea de 5° C. (se crea un equilibrio). En el caso del verano es exactamente lo mismo, pero en el otro sentido, moviéndose la energía térmica desde el exterior hacia el interior.

2.3.2. Envoltente aislada térmicamente.

Que una vivienda tenga una envoltente térmicamente aislada significa que los materiales que componen la envoltente deben ser materiales con una muy baja transmitancia térmica (U), ya que estos materiales transmiten la energía térmica desde el lado de mayor temperatura al de menor, al igual que todos los materiales, pero lo hacen a una velocidad muy lenta, lo que permite mantener la temperatura de confort humano por más tiempo al interior de la vivienda.

El único requisito para que una edificación entre en el estándar de vivienda pasiva (en el área de la aislación térmica de la envoltente) es el que ya se mencionó, la edificación debe tener un consumo anual en energía no mayor a 15 kWh por metro cuadrado habitable, lo que significa que no existen restricciones en cuanto al nivel de transmitancia térmica que debe tener la envoltente de la edificación, solo debe tener la transmitancia necesaria para lograr ese consumo energético o menos, y esto depende totalmente del clima en el que está ubicada la edificación. Lo que si establece el PHI en su documento “Criterios y algoritmos para componentes certificados Passivhaus”, es una referencia de niveles U que se deben cumplir en distintas zonas climáticas tipo del mundo, por ejemplo, en un clima donde las temperaturas máximas y mínimas sean muy extremas, como en Múnich, Alemania, el nivel de transmitancia (U) de la envoltente debe ser muy bajo, debe estar entre 0.1 y 0.15 W/(m²K). Mientras que, en un clima más templado, como en Santiago de Chile, donde las temperaturas mínimas y máximas no son tan extremas, el nivel U no debe ser mayor a 0.25 W/(m²K) (Passive House Institute, 2015).

Una buena aislación térmica se puede conseguir en cualquier sistema de construcción, ya se ha probado en distintas viviendas pasivas que se han construido en materiales sólidos como hormigón o albañilerías de todo tipo, también en materiales livianos como madera, zinc, yeso cartón, también en acero y en todo tipo de sistemas mixtos. Por otra parte, también hay casos de edificaciones ya construidas que no poseían una envoltente térmicamente aislada a las que se les aplicaron capas de material aislante suficiente con el propósito de transformarlas en viviendas pasivas.

Otro punto muy importante es la continuidad de la aislación térmica, es fundamental que toda la capa aislante de la envoltente sea continua y bien unida entre sí, no puede

haber ningún espacio en la envolvente, por más mínimo que sea, que no tenga material aislante, ya que esto significaría un punto de fuga en la envolvente que permitiría la salida de la energía térmica en invierno, o la entrada de ésta en el verano, lo que podría comprometer el gasto energético anual.

2.3.3. Materiales Aislantes.

Existe una amplia variedad de materiales que tienen una baja transmitancia térmica, los que son utilizados como aislantes para la envolvente de una edificación. Como se puede ver en la tabla presentada anteriormente (ver Tabla 1), hay algunos más eficientes que otros en cuanto a su nivel de conductividad, pero con todos ellos se puede lograr la transmitancia térmica deseada, cambiando solamente el espesor del elemento para lograrlo. En la siguiente tabla (ver Tabla 2), se puede ver de qué espesor tendrían que ser los distintos materiales aislantes para lograr una transmitancia térmica (U) de $0.25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ necesarios en la ciudad de Santiago de Chile.

Como en Santiago no se requiere un U tan alto, resulta bastante posible construir con los materiales aislantes comunes, como la lana mineral o el poliestireno expandido, ya que solamente se necesitaría un espesor de 160 mm de estos materiales.

2.4. Envolvente hermética

Conseguir que la envolvente de una vivienda esté aislada térmicamente es el punto más importante del estándar de vivienda pasiva, pero eso no serviría de mucho si es que esa misma envolvente no estuviera sellada herméticamente y permitiera entrar y salir el aire por múltiples filtraciones, ya que eso haría que la temperatura de confort humano al interior de la vivienda se viera profundamente afectada por la temperatura del aire

Tabla 2

Materiales aislantes, espesores necesarios para lograr un $U=0.25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Material	Conductividad Térmica [W/mK]	Espesor necesario para $U=0.25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Fardos de paja	0.055	25 cm.
Material aislante común	0.040	16 cm.
Material aislante de alta calidad	0.025	10 cm.
Material aislante con Nanoporos	0.015	6 cm.
Material aislante al vacío (Silica)	0.008	3,2 cm.
Material aislante al vacío (alta calidad)	0.002	0.8 cm.

Los valores de conductividad térmica presentados en esta tabla provienen del Passive House Institute (Passive House Institute, 1996-2018). Los valores de espesor son de cálculo propio.

exterior y costaría mucha energía mantenerla, dejando fuera de posibilidad la exigencia de consumo máximo de 15 kWh/m² al año. Entonces de eso se trata el principio de una envolvente hermética, de que además de tener una muy buena aislación térmica en la envolvente, que ésta esté completamente sellada y que no permita infiltraciones de aire, o que las reduzca lo máximo posible.

Otra razón por la que se aplica el principio de la envolvente hermética es la condensación. Siempre va a haber una diferencia de temperatura entre el aire al interior y al exterior de una edificación, y es debido a esa diferencia de temperatura en el aire que se forma la condensación. El PHI lo explica con el siguiente ejemplo² (ver Figura 1); supongamos que al interior de una edificación la temperatura del aire es de 20° Celsius y al exterior es de 0° Celsius, y como se ve en la fig. x, la edificación tiene un muro con una capa hermética que presenta un orificio de 1 mm de diámetro, por lo tanto, debido a la diferencia de temperatura, el aire caliente interior va a fugarse por ese orificio constantemente produciendo un fenómeno llamado exfiltración. El aire caliente contiene una mayor concentración de vapor de agua o humedad absoluta, entonces, durante el proceso de exfiltración, el aire que sale se enfría y al hacerlo ya no es capaz de contener la misma cantidad de vapor de agua, por ende, se condensa y genera agua en estado líquido dentro del muro mismo. Según las condiciones planteadas en el ejemplo y

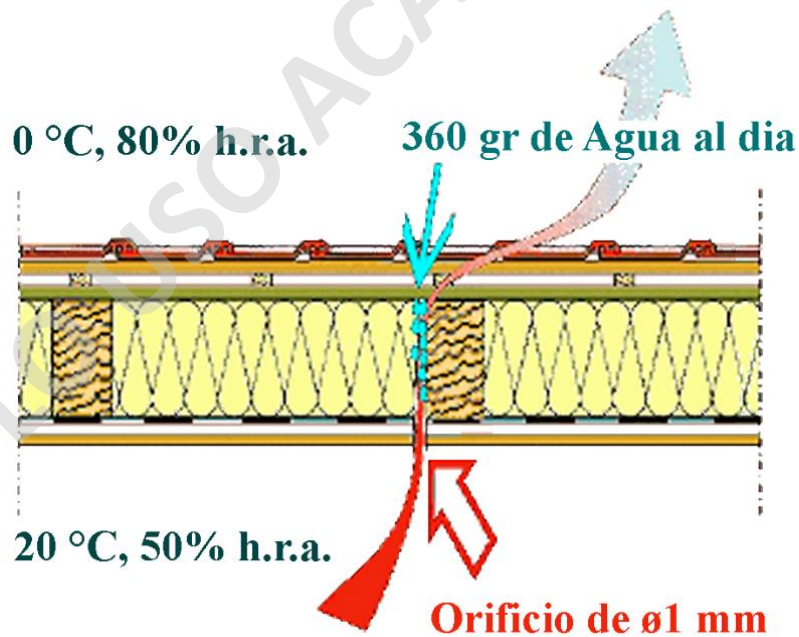


Figura 1, Exfiltración de aire produce condensación. Passive House Institute

² Fuente: Passive House Institute, mediante su enciclopedia en línea “Passipedia” (Passive House Institute, 2014-2018).

gracias a cálculos hechos por el PHI, se sabe que en 24 horas se genera un total de 360 gramos de agua en el punto de la exfiltración, lo que a largo plazo puede generar severos daños a la estructura. Éste es un problema muy común que ocurre en muchas viviendas en todo el mundo y para prevenirlo, la capa hermética se debe instalar de forma muy minuciosa. Es debido al problema de la condensación que la capa hermética debe instalarse en el lado interno de la envolvente, ya que, si la capa se instalase en el lado exterior, podría darse el caso de que en una zona específica del muro o techo, la estructura interna se mantenga constantemente a una temperatura más baja que el aire interior, produciéndose en ese punto una condensación no deseada.

La clave del éxito de este principio está en el diseño, se debe diseñar el edificio con el concepto de envolvente hermética muy presente, graficado en todos los planos como una línea roja que siga toda la envolvente, formando la ya mencionada “capa hermética”, ésta no se debe ver interrumpida en ningún punto (ver Figura 2) y debe envolver toda la zona donde se requiere confort térmico.

2.4.1. Las etapas del sellado hermético.

2.4.1.1. Primero.

Sin importar el sistema constructivo en el que se esté construyendo el edificio, se

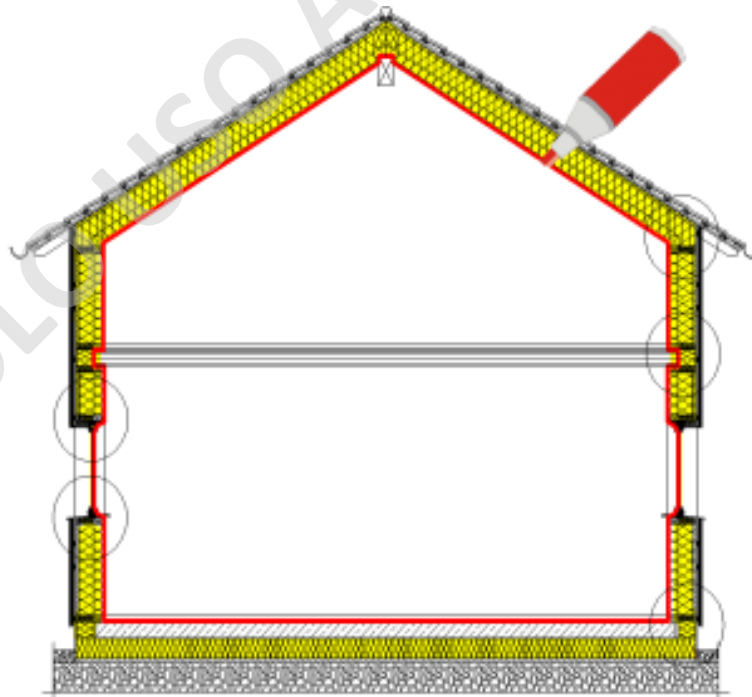


Figura 2, Sellado hermético de la envolvente, técnica del lápiz rojo. Passive House Institute

deben designar los componentes del sistema que formarán la “capa hermética” (ejemplos: un tablero interior de OSB en sistemas de madera, la capa de yeso interior de un sistema de albañilería, la losa entre el sótano y el primer nivel en un sistema de hormigón armado, etc.).

2.4.1.2. Segundo.

Una vez establecida la capa hermética, se debe diseñar e implementar un sistema que selle efectivamente las uniones de esta capa, siendo muy importante que este sistema de sellado, una vez instalado, perdure en el tiempo. Estas uniones deben demostrarse en detalles constructivos de forma muy clara, ya que una mala aplicación significaría inevitablemente una infiltración de aire, que luego sería tapada con algún revestimiento y se perdería en la totalidad de la edificación, haciendo muy difícil encontrar la filtración posteriormente.

2.4.1.3. Tercero.

La ubicación de la capa hermética se debe planificar tomando en cuenta los orificios o penetraciones que son necesarios, como entrada de cables para iluminación, interruptores, cañerías de agua, gas, ventilación u otros. La capa hermética se debe ubicar estratégicamente cuidando de minimizar la cantidad de penetraciones a las que se verá afectada y para las penetraciones que son inevitables, se debe establecer un plan de sellado con algún producto especial que elimine filtraciones de aire.

2.4.2. Requisitos asociados.

Para el principio de envolvente hermética, el estándar Passivhaus establece una norma específica, ya mencionada en el comienzo de este capítulo y detallada a continuación. Ésta consiste en que en una edificación no debe haber más de 0.6 ac/h, “air changes per hour” (0.6 cambios de aire por hora) bajo una presión hacia el exterior de 50 Pa, esto quiere decir que en una hora, estando la edificación con todas sus puertas y ventanas cerradas, y con una bomba de aire de 50 Pa de presión sacando aire de la edificación, el aire interior se debe renovar un máximo de 0.6 veces (la nomenclatura técnica de ese valor es 0.6 h^{-1} y se le llama el valor N_{50}) (Passive House Institute, 2016). Para medir los cambios de aire por hora se utiliza un método llamado el “Blower door test”, que consiste en ubicar un compresor de aire en el vano de una puerta de la envolvente de una edificación, y que aplicando una presión de 50 Pa, genera una succión, desde el interior hacia el exterior, que es capaz de detectar las infiltraciones de aire de la edificación además de medir la cantidad de aire que sale en el tiempo, esto relacionado con el volumen de aire interior total de la edificación, determina el valor N_{50} de la edificación. El blower door test se debe realizar cuando toda la envolvente ya esté terminada y la capa hermética debidamente sellada, pero es importante que se haga antes de aplicar el revestimiento interior que va sobre la capa hermética, con el fin de poder detectar infiltraciones fácilmente y repararlas.

2.5. Diseño libre de puentes térmicos

2.5.1. Definición de Puente térmico.

Para poder explicar este principio, primero es necesario entender qué son los puentes térmicos y cómo se comportan. Como se explica anteriormente y debido a un fenómeno físico, siempre que haya dos masas de aire separadas entre sí, una con temperatura ambiente mayor a la otra, la energía térmica va a fluir a través del elemento divisor desde el espacio de mayor temperatura hacia el espacio de menor, y al hacerlo, explicado de manera simplificada, la energía térmica va a seguir el camino que menos resistencia le oponga. En estos términos, un puente térmico es un camino que opone menos resistencia que las áreas adyacentes del mismo divisor de espacios (International Passive House Association, 2016).

En el caso de una edificación, la forma más fácil de explicarlo es en un sistema constructivo de tabiquería de madera. Si consideramos un tabique de madera común, conformado por pies derechos y material aislante entre éstos, puentes térmicos ocurren en los pies derechos, utilizándolos como conductores térmicos (ver Figura 3). Esto ocurre porque para la energía térmica es mucho más fácil atravesar la madera que el

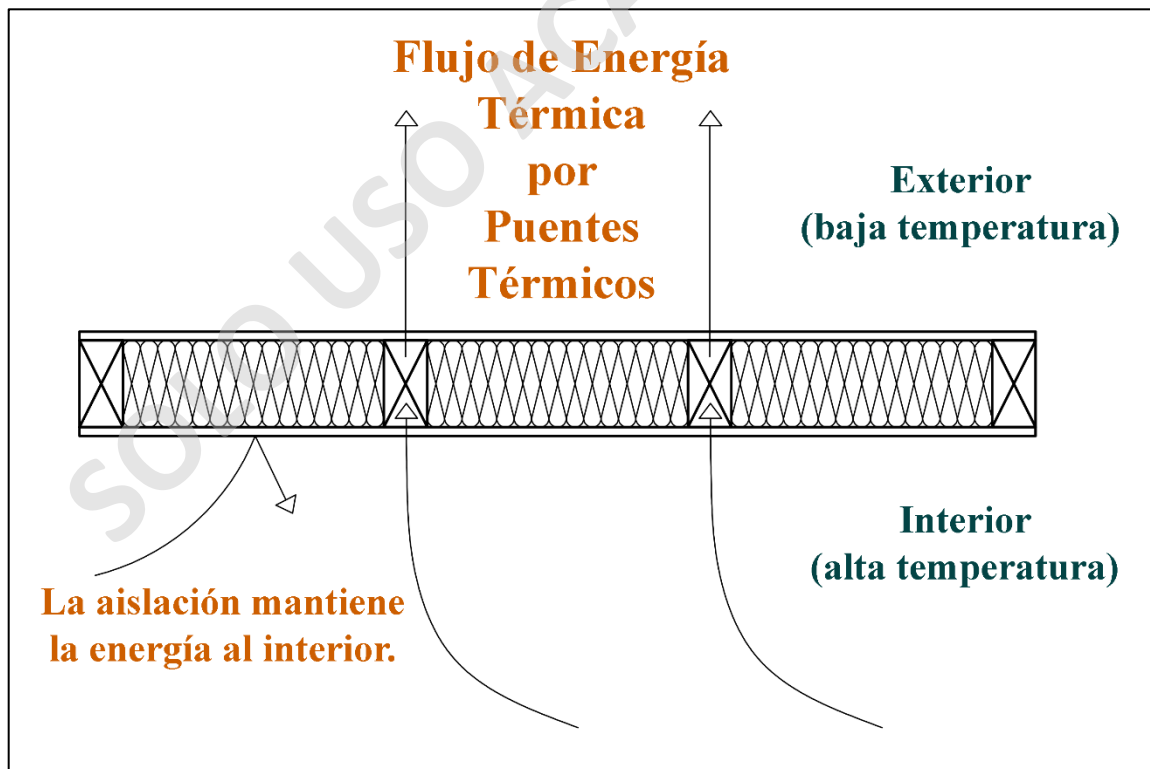


Figura 3, Flujo de energía térmica mediante los Pies derechos de un muro. Elaboración propia, 2018

material aislante, ya que, como es lógico, la madera tiene un nivel de transmitancia térmica bastante mayor que el material aislante.

Para detectar puentes térmicos, o verificar fugas de energía térmica, se utilizan instrumentos especiales que mediante fotografías Infrarrojas son capaces de graficar la temperatura de las superficies, graficando en tonos cálidos las zonas de mayor temperatura (amarillo lo más cálido) y en tonos fríos las zonas de menor (azul lo más frío). Se entiende entonces que, si vemos una de estas fotografías de detección térmica que muestre una fachada desde fuera, las zonas marcadas en tonos que se acerquen al azul o morado, serán las zonas donde menos se fuga la energía, mientras que las zonas en amarillo serán las zonas donde la energía térmica se está fugando con mayor facilidad, esas zonas son puentes térmicos (ver Imagen 6).

Es necesario entender que un puente térmico funciona en ambos sentidos, en invierno, la energía térmica se fugará por los puentes térmicos desde el interior de la edificación hacia el exterior, pero en verano, son los puentes térmicos los que permitirán el ingreso no deseado de energía térmica a la edificación.

2.5.2. Efectos de los puentes térmicos.

Si en la envolvente de una edificación hay puentes térmicos, éstos alterarán la temperatura de la superficie de la envolvente, provocando, en invierno, una pérdida no deseada de energía térmica en el interior de la edificación, y en verano, una ganancia no deseada de energía térmica.

Otros efectos son; la condensación superficial y la condensación al interior de la estructura de la envolvente. Como se explicó en el principio de envolvente hermética, la condensación ocurre cuando una masa de aire a cierta temperatura se enfría al contactar otra masa de aire que está a menor temperatura, pero no es el único caso, la condensación también ocurre cuando una masa de aire se enfría por contacto con



Imagen 6, Fotografías Infrarrojas exteriores de 2 edificaciones, muestran el flujo de energía térmica desde el interior hacia el exterior a través de la estructura de madera de la envolvente. Auscan Home Inspections.

cualquier otra masa que esté a menor temperatura, es decir, el contacto no tiene por qué ser con otra masa de aire, sino que cualquier otro material, por ejemplo, el entablado de madera que está en contacto directo con un puente térmico. Lo que ocurre al haber puentes térmicos, es que el aire interior cálido, al contactar la superficie del puente térmico, se enfría y puede generar una condensación superficial, lo mismo puede ocurrir no superficialmente, sino que al interior del muro mismo. Estas dos formas de condensación pueden ser muy perjudiciales, para el revestimiento del muro en un caso, y para la estructura interna del muro en el otro caso, ya que con el tiempo se genera moho y posible pudrición de los materiales (Corporación de Desarrollo Tecnológico, 2012).

Los efectos producidos por la existencia de puentes térmicos pueden evitarse únicamente eliminando los puentes térmicos. Si toda la envolvente de una edificación está libre de puentes térmicos, tiene una capa hermética interior sin filtraciones y una aislación térmica continua del espesor adecuado, la pérdida de energía térmica se vuelve insignificante y la totalidad de la superficie interior de la envolvente presentará una temperatura homogénea lo suficientemente alta para que el aire interior nunca llegue a condensarse y de esta forma, niveles críticos de humedad nunca llegarán a ocurrir, prolongando así la vida útil de la edificación por décadas.

2.5.3. Diseño libre de puentes térmicos.

Diseñar y construir un sistema constructivo libre de puentes térmicos no es una tarea fácil, es, en definitiva, el punto más difícil de lograr del estándar Passivhaus. Al igual que en el principio de envolvente hermética, se tiene que poder aplicar la técnica del lápiz continuo en todos los planos de la edificación, de manera que en plantas y en cortes, la capa de aislación térmica de la envolvente sea totalmente continua, no se puede ver interrumpida por ningún elemento que no sean ventanas o puertas.

Para cada sistema constructivo, el diseño libre de puentes térmicos es diferente, para algunos casos es más simple que para otros, por ejemplo, para un sistema constructivo en albañilería o en hormigón, no queda otra opción que aplicarle una capa aislante auto soportante y continua, adosada con productos especiales en todo el exterior de la estructura, siendo la única complejidad el encuentro con ventanas y puertas, casos en los que se aplican soluciones como marcos prefabricados de poliestireno expandido denso sobre los cuales se instala la ventana, sellada herméticamente con cintas especiales. Es en otros sistemas, como en tabiquerías de madera o de metal, que diseñar de manera que la envolvente quede libre de puentes térmicos se vuelve más complejo. Para esos sistemas, el PHI ofrece de forma gratuita todo tipo de soluciones constructivas certificadas que son libres de puentes térmicos³.

³ Ver manual de soluciones constructivas “Das Passivhaus, Energie-Effizientes-Bauen” (Feist & Kaufmann, 2002)

2.6. Ventanas y puertas pasivas

Este principio establece que, para el estándar Passivhaus, se necesitan ventanas y puertas especiales con un nivel de transmitancia térmica específico, a fin de no superar el consumo de 15 kWh/m² al año.

El PHI dispone en su página web, de un documento específico llamado “Criterios y algoritmos para componentes certificados Passivhaus”, en él se presenta un mapa del mundo dividido en 7 zonas climáticas (ver Figura 4), y también establece la transmitancia térmica (U) máxima que deben cumplir las puertas y ventanas en cada una de esas 7 zonas (ver Tabla 3) (Passive House Institute, 2015).

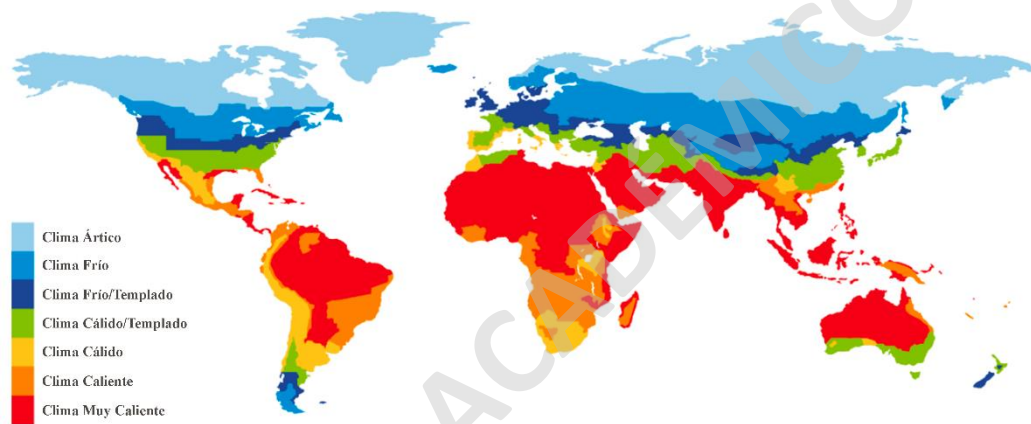


Figura 4, Mapa mundial de zonas climáticas según el estándar Passivhaus. (Passive House Institute, 2015)

Tabla 3
Valores U para ventanas según zona climática

Zona Climática	Valores U para ventanas, marco incluido $\leq [W/(m^2K)]$	Valores U para vidrio de ventanas $\leq [W/(m^2K)]$
1. Ártico	0.45	0.35
2. Frio	0.65	0.52
3. Frio/Templado	0.85	0.70
4. Cálido/Templado	1.05	0.90
5. Cálido	1.25	1.10
6. Caliente	1.25	1.10
7. Muy Caliente	1.05	0.90

La información presentada en esta tabla proviene del documento “Criterios y algoritmos para componentes certificados Passivhaus” (Passive House Institute, 2015).

En el mapa global de las zonas climáticas (ver Figura 4), no se ve claramente la situación chilena, por lo que en la siguiente figura (ver Figura 5), se muestra un zoom de Sudamérica, donde se puede ver que aproximadamente desde la ciudad de Santiago hacia el norte de Chile, se califica como un clima cálido. Santiago incluido y hasta Puerto Montt, se califica entre los climas cálido y cálido/templado (cálido hacia la costa y cálido/templado hacia la Cordillera de los Andes). Desde Puerto Montt hasta Cochrane aproximadamente, se califica como clima frío/templado, y desde Cochrane al sur, se califica como clima frío. De esta forma, la ciudad de Santiago de Chile estaría calificada como un clima cálido/templado según el estándar Passivhaus, lo que establece el valor U para las ventanas y puertas en un máximo de 1.05 W/(m²K), y en 0.9 W/(m²K) para el vidrio mismo de las ventanas (y puertas, si es que tienen vidrio).

Es evidente que para poder lograr los valores U para ventanas y puertas ya establecidos, se necesitan, en el caso de ventanas y puertas vidriadas, productos especiales donde el vidriado sea hermético y altamente aislante. Es por esto que el PHI dispone en su página web de un largo listado de productos certificados, con la información de sus respectivos proveedores, que cumplen con los valores U establecidos para las distintas zonas climáticas, y que incluyen detalles técnicos de los mismos productos (Passive House Institute, 1996-2018). En esos detalles se puede ver que todas las ventanas asociadas al clima cálido/templado de valor U máximo de 1.05 W/(m²K), son ventanas de triple vidriado hermético, con un complejo sistema de marcos altamente aislados, disponibles en variadas materialidades y que además incluyen sistemas de apertura y cierre sellados de manera completamente hermética. Proveedores de ventanas y puertas vidriadas certificadas para el clima cálido/templado, se pueden encontrar en: Australia, Canadá, China, España, Grecia, Italia, Japón y Nueva Zelanda. Esto último no



Figura 5, Mapa de zonas climáticas de Sudamérica. (Passive House Institute, 2015)

debiese ser una complicación en Chile, ya que a muchos proveedores chilenos se les puede encargar productos especiales que cumplan las características necesarias o, en el peor de los casos, se pueden importar desde China o alguno de los otros países.

La mayor complejidad de este principio se encuentra en la unión de los marcos especiales aislados de ventanas y puertas con el muro sólido, ya que, de no ubicarlos en la posición correcta, es muy probable la generación de un puente térmico no deseado. Básicamente, el marco del elemento se debe ubicar en línea con la capa de aislación térmica de la envolvente (ver Figura 6), de manera que el marco aislado contacte con material aislante y no con material sólido, eliminando así el puente térmico. Para estas situaciones específicas, el PHI también ofrece soluciones para distintos sistemas constructivos, todos ellos se pueden encontrar en la base de datos de componentes certificados de la página web del PHI.

2.7. Ventilación con recuperación de energía térmica

El último de los 5 principios del estándar Passivhaus es el de la ventilación con recuperación de energía térmica, éste es un principio que utiliza modernas tecnologías para lograr ventilar y calefaccionar el interior de una edificación al mismo tiempo.

2.7.1. Ventilación.

Como ya está explicado, en una Passivhaus la envolvente de la edificación está sellada herméticamente y, bajo condiciones normales, no permite la entrada o salida de

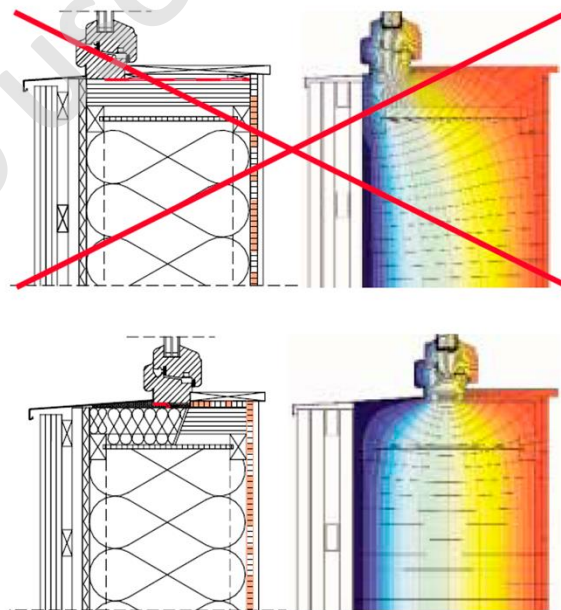


Figura 6, Escantillón de la ubicación correcta de una ventana. (Feist & Kaufmann, 2002)

aire por ninguna parte, por lo que, con el propósito de mantener la calidad del aire necesaria para los humanos, es necesario renovar el aire interior de la edificación y para esto se utilizan sistemas de ventilación. Los sistemas de ventilación tienen que poder renovar el aire un mínimo de 0.33 veces por hora y deben ofrecer la opción de aumentar ese flujo con el propósito de limpiar el aire más rápido en caso de haber algún agente contaminante en el aire o simplemente porque hay más gente de lo normal dentro de la edificación y se requiere más aire limpio (Feist, 2003).

Las dimensiones del sistema completo de ventilación, incluyendo bombas de aire y ductos, se deben calcular de acuerdo con el volumen interior total de la edificación, la cantidad de personas que utilizarán regularmente la edificación y las distancias que deberá recorrer el aire dentro de la misma. Para estos cálculos se debe utilizar el PHPP, que después de ingresarle los datos ya mencionados, entregará los valores de potencia para la bomba de aire, además del diámetro y largo máximo de los ductos de ventilación.

Tanto en edificaciones residenciales como no residenciales, hay lugares donde se produce más humedad y donde hay más riesgo de agentes contaminantes del ambiente, como baños y cocinas, aquí se requiere que ese aire salga constantemente. Mientras que, en los otros lugares, las zonas habitables como dormitorios, salas de estar u oficinas, debido a su uso constante, necesitan suministro de aire fresco. Por esta razón, el estándar Passivhaus establece que los ductos de extracción de aire se instalen en baños y cocinas, mientras que los ductos de suministro de aire fresco se instalen en las áreas funcionales como dormitorios, salas de estar y oficinas (ver Figura 7) (Feist, 2003). Además, todas las áreas divididas entre sí que estén dentro de la envolvente de una edificación deben estar conectadas mediante pasos libres de aire instalados en las puertas.

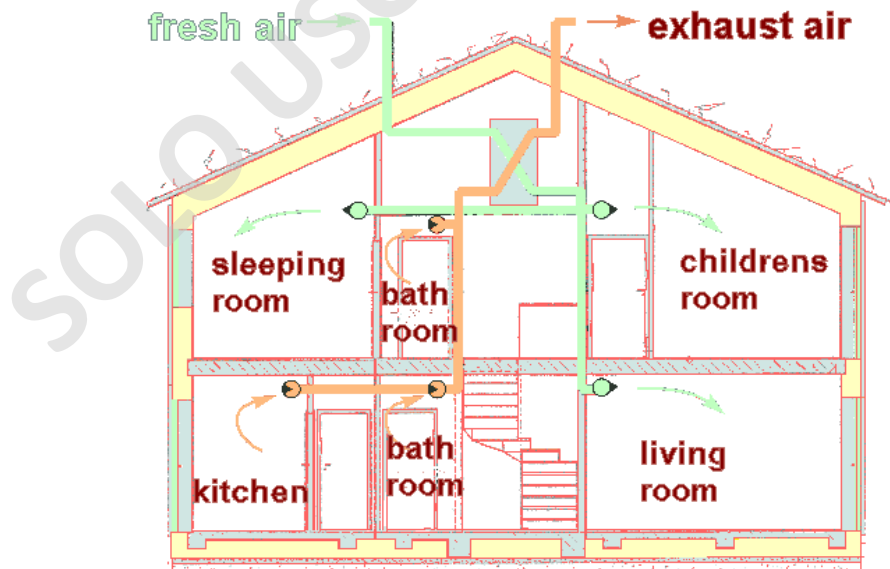


Figura 7, Ubicación de la extracción e ingreso de aire en un sistema de ventilación. (Passive House Institute, 2014-2018)

2.7.2. La recuperación de la energía térmica.

El concepto de recuperación de la energía térmica consiste básicamente en utilizar la energía térmica propia del aire que se extrae de la edificación para calentar el aire que ingresa a la edificación, generando así un ciclo infinito donde el aire se renueva, pero no pierde la energía térmica. Eso es sólo el concepto, porque técnicamente hablando es bastante más complejo, el método se llama “Heating, ventilation and air conditioning” (HVAC), en español: “Calefacción, ventilación y aire acondicionado”. Existen varios sistemas HVAC, uno de ellos, y que es el más eficiente, es la unidad compacta de bomba de calor (ver Figura 8), éste es un sistema compuesto de varias partes que además de recuperar la energía térmica del aire, incluye la calefacción del agua caliente domiciliaria (Passive House Institute, 2014-2018). Este sistema ocupa espacio físico, se le deben

UNIDAD COMPACTA DE BOMBA DE CALOR

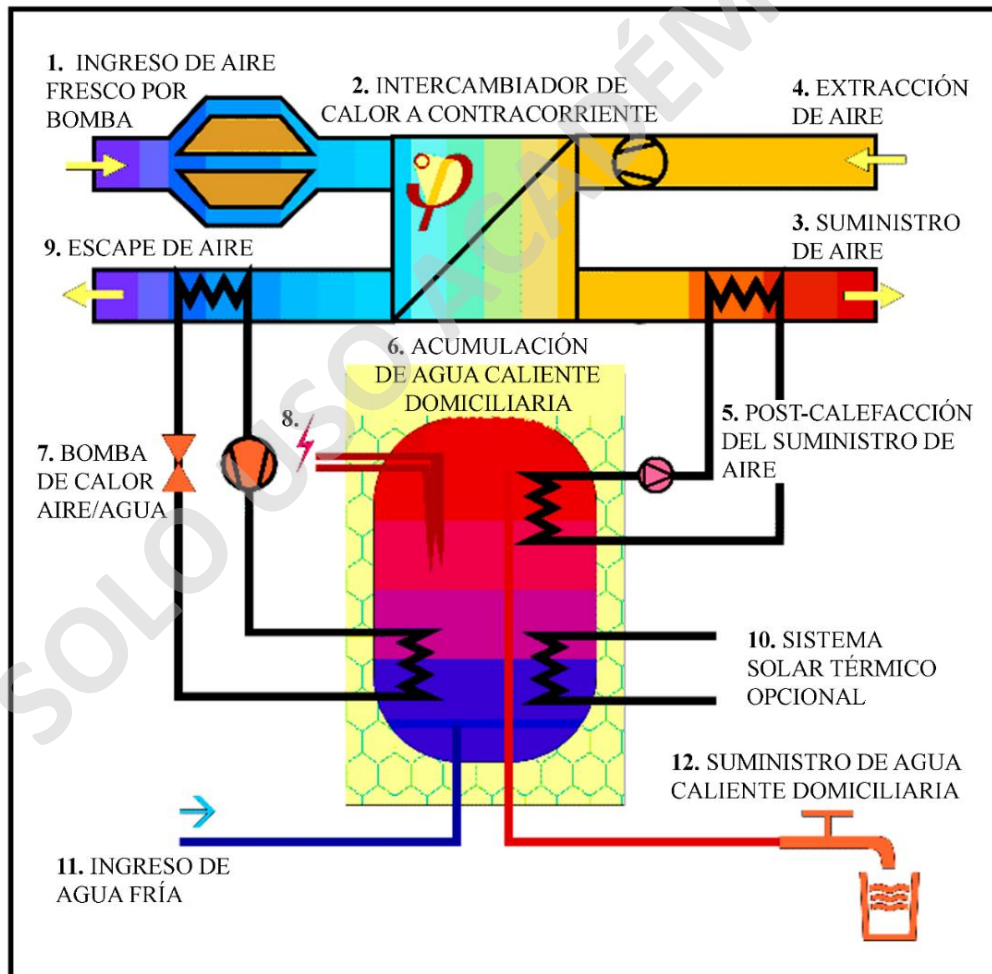


Figura 8, Esquema de una unidad compacta de bomba de calor. (Passive House Institute, 2014-2018)

poder hacer mantenencias fácilmente y emite ruido que puede ser molesto, por lo que se debe ubicar en un cuarto especial de la edificación con espacio para las instalaciones necesarias y propiamente aislado contra el paso del sonido.

2.7.3. Unidad compacta de bomba de calor.

Para explicar detalladamente en que consiste la unidad compacta de bomba de calor, se muestra el esquema de la unidad compacta de bomba de calor (ver Figura 8) donde se ven todos sus componentes numerados para facilitar su explicación. Se detallan esos componentes a continuación.

2.7.3.1. 1. Ingreso de aire fresco por bomba.

Este es el ingreso de aire fresco al sistema, consiste en un ducto que se conecta a una bomba de aire, la cual succiona aire fresco del exterior y lo bombea hacia el interior del sistema.

2.7.3.2. 2. Intercambiador de calor a contracorriente.

Esta es una de las partes más importantes del sistema, es un mecanismo donde se le quita la energía térmica al aire que se extrae de la edificación y, utilizando un intercambiador de calor, entrega esta energía al aire de suministro sin mezclar los flujos de aire (ver Figura 9). De esta forma el aire de suministro entra tibio y el aire de escape sale frío. Hoy en día, las modernas tecnologías de ventilación e intercambiadores de calor permiten una recuperación de energía térmica entre el 75 y el 90 %. Esto es posible gracias a los intercambiadores de calor a contracorriente y a modernos ventiladores energéticamente eficientes, equipados con motores EC que tienen un consumo particularmente bajo. Con estos modernos aparatos, la energía térmica recuperada es equivalente a entre 8 y 15 veces la electricidad consumida por los mismos sistemas (Passive House Institute, 2014-2018).

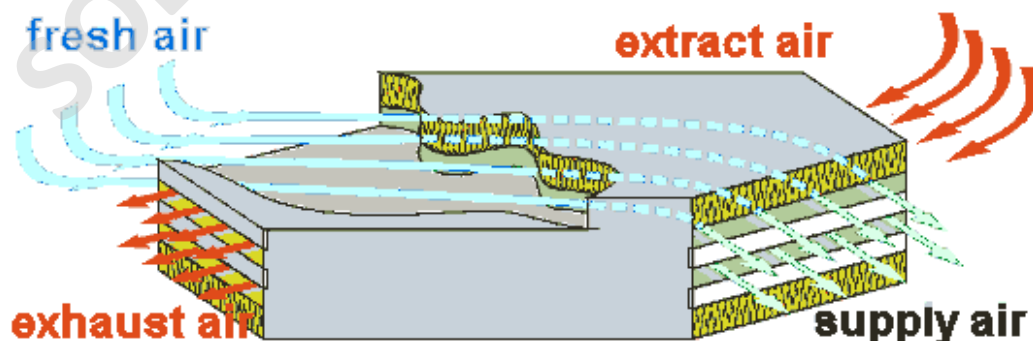


Figura 9, Esquema de un intercambiador de calor a contracorriente. (Passive House Institute, 2014-2018)

2.7.3.3. 3. Suministro de aire.

Este es el punto donde el aire que ya recuperó la energía del aire de salida, y ya fue calefaccionado por el sistema de post calefacción, se conecta con los ductos de suministro que entregarán aire fresco a las áreas funcionales como dormitorios, salas de estar y oficinas.

2.7.3.4. 4. Extracción de aire.

De las áreas húmedas y de mayor polución, como baños y cocinas, salen ductos de extracción que se conectan a este punto del sistema, que, mediante un extractor de aire de bajo consumo, extrae el aire y lo dirige hacia el intercambiador de calor a contracorriente (punto 2) que luego lo dirige hacia el escape de aire (punto 9).

2.7.3.5. 5. Post calefacción del suministro de aire.

Este es un sistema que utiliza la energía térmica del agua caliente domiciliaria acumulada (punto 6) para calefaccionar el aire de suministro, es un sistema ajustable que permite dejar el aire de suministro a la temperatura necesaria para mantener el interior de la edificación a la temperatura de confort humano. En algunos casos y dependiendo de la complejidad del sistema, el usuario puede modificar la temperatura a la que ingresa el aire de suministro hasta cierto punto.

2.7.3.6. 6. Acumulación de agua caliente domiciliaria.

Todo el sistema funciona con el agua caliente como medio, aquí el agua se calienta parcialmente mediante una bomba de calor aire/agua (punto 7), un sistema opcional de energía solar (punto 10), y la energía térmica restante para alcanzar la temperatura necesaria del agua la entrega un sistema de calefacción eléctrico de bajo consumo (punto 8). Todos los sistemas que calienten el agua deben instalarse en la parte baja de la acumulación. Esta acumulación se debe realizar en un termo altamente aislado capaz de acumular el agua suficiente para su uso diario, el cálculo del volumen de agua se debe realizar mediante el PHPP de acuerdo con la cantidad de personas que utilizarán regularmente la edificación. A este termo debe ingresar el agua fría por debajo (punto 11) y se debe extraer el agua caliente para consumo por arriba (punto 12), ya que físicamente el agua caliente sube y la fría se mantiene abajo.

2.7.3.7. 7. Bomba de calor aire/agua.

Éste es el aparato tecnológico más complejo del sistema, utiliza la energía térmica propia del aire que ya está en la fase de escape (aire al cual ya se le extrajo gran cantidad de energía mediante el intercambiador de calor a contracorriente), y aplica esta energía térmica restante para calentar el agua acumulada en el termo (punto 6). Es lógico pensar que la energía térmica del aire en la fase de escape es muy poca, y que, si se transmitiera al agua para calentarla, su aporte sería casi insignificante. Pero esto no es así, ya que las

bombas de calor funcionan utilizando líquidos anticongelantes altamente volátiles, que son capaces de absorber grandes cantidades de energía térmica de un aire que puede estar incluso bajo los 0° Celsius. Este líquido anticongelante, al absorber la energía térmica del aire, se evapora y pasa a estado gaseoso, que luego al ser comprimido libera altas cantidades de energía térmica, y es esta energía la que se utiliza para calentar el agua. Después el anticongelante en estado gaseoso pasa por una válvula que lo descomprime y así vuelve a su estado líquido, quedando listo para empezar el ciclo nuevamente. Las bombas de calor utilizan niveles extremadamente bajos de electricidad, ya que ésta solo se necesita para comprimir el anticongelante en estado gaseoso (Fuentes Molina & Trapp Medina, 2009).

2.7.3.8. 8. Calefactor de agua eléctrico de bajo consumo.

Éste es básicamente un calefactor de agua eléctrico común, que utilizando electricidad calienta el agua tal cual como lo hace un hervidor eléctrico, pero lo hace de manera lenta y constante, consumiendo así bajos niveles de electricidad, además para calentar el agua recibe la ayuda de la bomba de calor (punto 7) y opcionalmente del calefactor solar (punto 10). Aun así, es la fase que más electricidad consume del sistema. Este calefactor, utilizando un termostato, debe dejar de calentar el agua cuando en el termo ya se alcanzó la temperatura necesaria, y debe volver a funcionar cuando al utilizar agua caliente, ingrese agua fría al sistema. Sin embargo, ésta es una fase de apoyo, ya que el aporte energético de la bomba de calor y del calefactor solar tienen prioridad frente a esta fase, y ésta no debería entrar en funcionamiento hasta que los otros dos aportes no sean suficientes para lograr la temperatura deseada del agua.

2.7.3.9. 9. Escape de aire:

Por este punto escapa el aire hacia el exterior, este aire sale a baja temperatura, ya que primero se le extrajo la energía térmica para entregársela al aire de suministro mediante el intercambiador de calor a contracorriente (punto 2) y luego se le extrajo aún más energía térmica mediante los sistemas de la bomba de calor aire/agua (punto 7).

2.7.3.10. 10. Sistema térmico solar opcional:

Este sistema puede ser un aporte muy útil de energía térmica para calentar el agua del termo, funciona calentando agua mediante energía solar y la cantidad de energía que aporte depende del tamaño del sistema. Mientras más colectores solares se instalen, mayor será el aporte de energía térmica y, por ende, menor será la energía que tendrá que aportar el sistema de calefacción eléctrica (punto 8). Este es un sistema opcional, pero el estándar Passivhaus recomienda altamente su instalación.

2.7.3.11. 11. Ingreso de agua fría:

Por aquí ingresa el agua fría al termo para luego ser calentada.

2.7.3.12. 12. Suministro de agua caliente domiciliaria:

Este es el punto de salida de agua que ya fue calentada mediante los variados sistemas de calefacción, de aquí se conecta a la red de agua caliente domiciliaria.

2.7.4. Dónde conseguir un sistema HVAC.

Cada sistema HVAC es distinto dependiendo de los requerimientos del proyecto, para esto el PHI ofrece en su página web un listado de proveedores que ofrecen sistemas HVAC certificados de distintos tamaños y especificaciones, pero nuevamente, no son proveedores que se encuentren en Chile. De todas formas, en Chile si hay proveedores (no certificados por el PHI) que ofrecen sistemas HVAC y que son igualmente válidos que los que sí están certificados por el estándar.

2.8. Otros principios pasivos del estándar

Al diseñar una edificación para el estándar Passivhaus, además de tener que seguir al pie de la letra lo especificado en los cinco principios ya explicados, es necesario cumplir con otros parámetros de diseño relacionados al concepto del uso pasivo de la energía. Estos parámetros se detallarán a continuación.

2.8.1. Sombras y uso pasivo de la energía solar.

Es muy importante en el diseño de una edificación con estándar Passivhaus el aprovechamiento de la energía que entrega naturalmente el sol, es por esto que, en primera instancia, la edificación se debe orientar hacia donde está el sol la mayor parte del año, y en el caso de Chile, que está en el hemisferio sur, esta orientación es hacia el Norte. La edificación, por tanto, debe estar pensada de tal forma que todas las habitaciones funcionales como dormitorios, salas de estar, oficinas, y otros, tengan una ventana y/o puerta vidriada orientada hacia el norte, de manera que, en invierno, cuando se requiere calefaccionar el interior, la radiación solar que ingresa por las ventanas sea otro aporte de energía térmica para calentar el ambiente interior. Además, esto entrega un aporte lumínico importante, disminuyendo así el uso de iluminación artificial.

Para el caso del verano, cuando en vez de calefaccionar, se requiere enfriar el ambiente interior, todas estas ventanas orientadas hacia el norte producirán por radiación solar, un aumento en la energía térmica del ambiente interior no deseado que puede significar un problema mayor. Para esto, se deben incluir en el diseño sistemas de producción de sombra como aleros, persianas o celosías que permitan bloquear el acceso extremo de sol por las ventanas. Lo ideal es que estos sistemas de producción de sombra sean operables, de tal manera que en invierno se puedan ubicar de forma que permitan la entrada de radiación solar y que, en verano, bloqueen la entrada de la radiación, manteniendo el ambiente interior a la temperatura de confort humano durante todo el año. Un ejemplo básico de esto se muestra en el siguiente esquema (ver Figura 10).

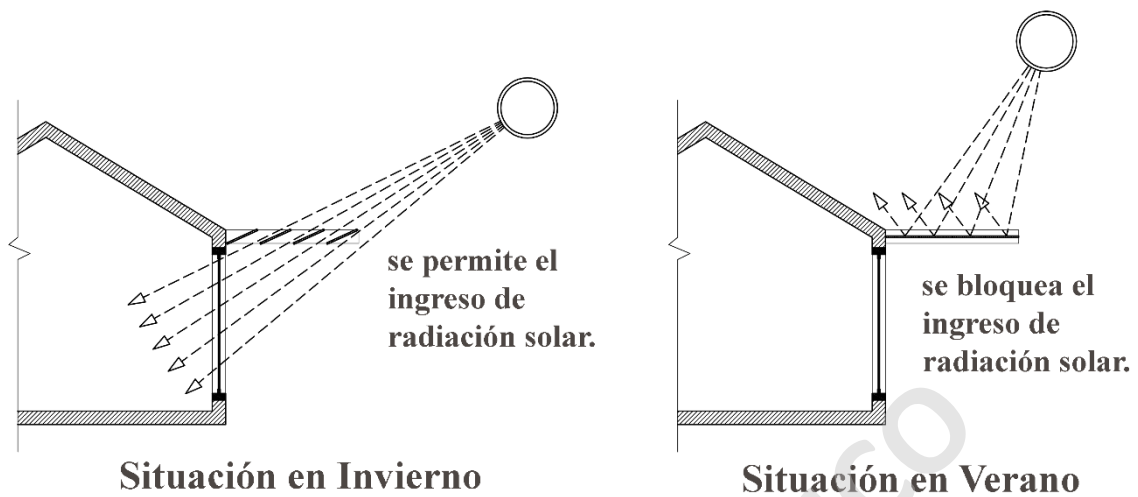


Figura 10, Esquema de sistema de control de sombra regulable. Creación propia.

2.8.2. Diseño de edificaciones compactas.

Otro punto importante es que el diseño ideal de una edificación Passivhaus, debe tener una morfología compacta, donde todas sus habitaciones estén lo menos alejadas una de otra, de tal manera que la envolvente no tenga que estirarse mucho para abarcar todas las zonas. Si se realizara un diseño con morfología lineal por ejemplo, donde todas las habitaciones estén en un primer piso conectadas mediante pasillos, abarcando una superficie lineal de terreno, primero la envolvente de la edificación sería mayor, lo que significaría mayores costos de construcción en materiales aislantes y herméticos, y segundo, resultaría difícil repartir la energía térmica dentro de la edificación de forma homogénea, causando entonces un gasto mayor de energía para mantener calefacionadas estas habitaciones “aisladas”, además de que los ductos de ventilación tendrían que recorrer trechos más largos para llegar a su destino, perdiendo energía térmica en el camino y necesitando también una presión de aire mayor para llegar. En el caso contrario, con un diseño morfológicamente compacto, primero la envolvente de la edificación es menor, generando un ahorro importante en materiales, y segundo, la energía térmica del ambiente interior fluiría fácilmente entre habitaciones, llegando a todos los rincones sin problemas y no requiriendo ductos de ventilación muy largos para llegar a su destino, esto se traduce en bajos costos en calefacción y así es más fácil lograr una edificación energéticamente eficiente.

3. Contexto legal y técnico para la aplicación del estándar Passivhaus en Chile

Para poder aplicar el estándar Passivhaus en Chile, es necesario analizar la normativa chilena en el contexto de la aislación térmica y la ventilación, esto con el fin de identificar posibles incongruencias entre las exigencias del estándar y las exigencias legales chilenas, determinando así si existe algún obstáculo legal que impida la aplicación correcta del estándar en una edificación en Chile.

3.1. Contexto histórico de la normativa térmica chilena

En el año 1994, el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU), pone en marcha el programa de reglamentación térmica de viviendas, un programa que se pensó originalmente en 3 etapas. En su primera etapa, en 1994, el MINVU modificó la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC), añadiendo, mediante el Decreto Supremo N°47, una reglamentación térmica donde se incluyeron únicamente exigencias de acondicionamiento térmico a los elementos de techumbre de las viviendas. Esta normativa se mantuvo hasta el 4 de enero de 2007, fecha en la que, mediante el Decreto Supremo N°192 que modifica el Decreto N°47 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, entra en vigencia la segunda etapa del programa de reglamentación térmica de viviendas. En esta segunda etapa, vigente actualmente, se incluyen exigencias más estrictas de acondicionamiento térmico para las techumbres, además de añadir exigencias para los muros, pisos ventilados y una reglamentación que restringe la superficie máxima de ventanas (Instituto de la Construcción, 2006). La tercera etapa aún no tiene fecha de lanzamiento, pero ésta, además de volver a modificar las exigencias de acondicionamiento térmico de la envolvente, considerará una certificación obligatoria de consumo energético y eficiencia térmica sobre el comportamiento global de la edificación. Esta certificación, llamada “Calificación Energética de Viviendas” (CEV) se lanzó en el año 2012 a modo de prueba y como un instrumento opcional para que los usuarios de las edificaciones puedan saber, entre otras cosas, cuánta energía consume su vivienda en los ámbitos de calefacción, enfriamiento, iluminación y agua caliente sanitaria. El CEV es una herramienta basada en Microsoft Excel, la cual, al ingresarle datos de configuración de la envolvente y de artefactos de calefacción entre otras cosas, entrega valores en consumo anual de energía por metro cuadrado (kWh/m²a), y califica de acuerdo a un porcentaje de ahorro de energía y con un sistema de letras desde A+ hasta G, donde G es la menos eficiente y la letra E representa el cumplimiento del estándar térmico actual de la OGUC (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2012). En abril del año 2018, se lanzó una nueva versión de la calificación energética de viviendas, el CEV 2.0, donde se facilita el uso de la herramienta y se añaden, entre otras cosas, mejoras en el ámbito de las filtraciones y condensación [REVISAR].

3.2. Artículo 4.1.10, OGUC, acondicionamiento térmico de viviendas⁴

Este artículo establece todas las exigencias de acondicionamiento térmico que deben cumplir las viviendas construidas a partir del 4 de enero del 2007 en Chile.

Para una aplicación correcta de las exigencias y ya que a lo largo del territorio chileno hay muchas condiciones climáticas con grandes diferencias entre una y otra, el MINVU divide todo el territorio chileno en 7 zonas climáticas, cada una de estas con distintas exigencias de acondicionamiento térmico de envolvente y superficie máxima de ventanas. Los planos donde se especifican las distintas zonas climáticas están disponibles en la página web del MINVU (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2007), y además están disponibles en el de esta investigación.

3.2.1. Exigencias de acondicionamiento térmico de la envolvente.

Los elementos que conforman la envolvente de la edificación se dividen en; Techumbre, Muros perimetrales y Pisos ventilados, éstos deberán tener una transmitancia térmica “U” igual o menor, o una resistencia térmica total “Rt” igual o superior, a la señalada para cada zona climática en la siguiente tabla (ver Tabla 4).

Tabla 4
Valores U y Rt de los componentes de la envolvente

Zona Climática	Techumbre		Muros		Pisos Ventilados	
	U W/m ² K	Rt m ² K/W	U W/m ² K	Rt m ² K/W	U W/m ² K	Rt m ² K/W
1	0.84	1.19	4.00	0.25	3.60	0.28
2	0.60	1.67	3.00	0.33	0.87	1.15
3	0.47	2.13	1.90	0.53	0.70	1.43
4	0.38	2.63	1.70	0.59	0.60	1.67
5	0.33	3.03	1.60	0.63	0.50	2.00
6	0.28	3.57	1.10	0.91	0.39	2.56
7	0.25	4.00	0.60	1.67	0.32	3.13

La información presentada en esta tabla proviene de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC). (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 1992)

⁴ Toda la información que se presenta bajo este título proviene de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC), específicamente del Artículo 4.1.10 (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 1992), y ha sido reducido mediante redacción propia con el fin de facilitar su lectura. Se puede consultar el Artículo original en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** de esta investigación.

Para cumplir las exigencias que se presentan en la tabla anterior (ver Tabla 4), se puede presentar un certificado de ensaye otorgado por un laboratorio de control técnico de calidad de la construcción, que demuestre que se cumplen los valores “U” establecidos. Otra opción es la realización de un cálculo firmado por un profesional competente que demuestre el cumplimiento de la norma. También existe la opción de edificar utilizando una de las soluciones inscritas en el Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Acondicionamiento Térmico confeccionado por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo. Por último, se puede utilizar como capa de aislación térmica para todos los elementos de la envolvente, algún producto que certifique el cumplimiento de los valores R100 especificados en la siguiente tabla (ver Tabla 5)

Para los distintos elementos de la envolvente, la OGUC especifica aclaraciones normativas que se deben cumplir, a continuación, se mencionan las aclaraciones que se consideran relevantes a esta investigación.

3.2.1.1. Aclaraciones sobre Techumbre.

Se considera un complejo de Techumbre al conjunto de elementos constructivos que lo conforman, estos son: cielo, aislación térmica, cubierta, cadenetas y vigas. Además, la inclinación máxima de estos elementos debe ser de un máximo de 60° sexagesimales desde el plano horizontal, si fuera más, no se considera techumbre sino muro.

Para minimizar puentes térmicos, la capa aislante continua de la techumbre se puede interrumpir únicamente por elementos estructurales (cerchas o vigas), y por ductos, tuberías o cañerías de instalaciones domiciliarias.

Tabla 5
Valores alternativos R100 para los componentes de la envolvente

Zona Climática	Techumbre R100	Muros R100	Pisos Ventilados R100
1	94	23	23
2	141	23	98
3	188	40	126
4	235	46	150
5	282	50	183
6	329	78	239
7	376	154	295

La información presentada en esta tabla proviene de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC). (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 1992)

El área de unión entre muros y techumbres debe estar aislado térmicamente, conformando un elemento continuo en todo el perímetro de la envolvente.

Para toda vivienda emplazada entre las zonas climáticas 3 y 7, ambas incluidas, los elementos traslúcidos que sean parte del diseño de un complejo de techumbre deben tener tecnologías de doble vidriado hermético con una transmitancia térmica igual o menor a $3,6 \text{ W/m}^2\text{K}$.

3.2.1.2. Aclaraciones sobre Muros.

Se considera un complejo de Muro al conjunto de elementos constructivos que lo conforman y cuyo plano de terminación interior tenga una inclinación de más de 60° sexagesimales medidos desde la horizontal.

Las exigencias señaladas en la Tabla 4, aplican solamente a muros que conformen la envolvente, no aplica a muros divisorios interiores.

Al igual que en la techumbre, para evitar puentes térmicos, la capa aislante podrá ser interrumpida únicamente por elementos estructurales y de servicio como cañerías u otros.

En el caso de un sistema constructivo de albañilería confinada, el valor U especificado en la Tabla 4, no aplica para los elementos estructurales de este sistema, ya sean pilares, cadenas o vigas.

Si el complejo de Muro incorpora materiales aislantes, la solución constructiva deberá incluir barreras de humedad y/o de vapor.

Para puertas vidriadas exteriores, deberá considerarse como superficie de ventana la parte correspondiente al vidrio de la misma.

Todo tipo de puertas ubicadas en la envolvente y que no sean de vidrio, no tienen exigencias de acondicionamiento térmico.

3.2.1.3. Aclaraciones sobre Pisos Ventilados.

Se considera un complejo de Piso Ventilado al conjunto de elementos que conforma un piso que no esté en contacto directo con la superficie de terreno natural. Los planos inclinados como escaleras o rampas que estén en contacto con el exterior, también se considerarán como Pisos Ventilados.

De la misma forma que en muros y techumbres, para evitar puentes térmicos, solo se aceptan interrupciones a la capa aislante si el elemento es estructural o de servicios como cañerías y otros.

3.2.2. Exigencias sobre la superficie máxima de ventanas.

La OGUC restringe la superficie de ventanas que tendrá una edificación en su envolvente, lo hace mediante porcentajes en relación a la superficie interior total de los elementos verticales de la envolvente (complejo de muros). Para esto, dispone la siguiente tabla (ver Tabla 6), donde establece porcentajes de superficie máxima de ventanas para cada zona climática.

En la Tabla 6, se ven las superficies máximas de ventanas que puede tener la envolvente para cada clima, pero estas superficies cambian de acuerdo al material del que estarán hechas las ventanas, ofrece tres opciones; Vidrio Monolítico, Doble Vidriado Hermético (DVH) de un valor U entre 3.6 y 2.4 W/m²K, y DVH de valor U menor a 2.4 W/m²K.

3.2.2.1. Aclaraciones sobre superficies y tipos de ventanas.

La superficie de ventanas que se considerarán dentro del porcentaje establecido en la Tabla 6, corresponde a la suma de las superficies de los vanos de la envolvente en los que se ubicarán las ventanas, es decir, se incluyen las superficies que ocupan los marcos de las mismas ventanas.

Existe una alternativa al cumplimiento de lo establecido en la Tabla 6, esta alternativa

Tabla 6
Porcentaje máximo de superficies vidriadas respecto a parámetros verticales de la envolvente

Zona Climática	Vidrio Monolítico	Doble Vidriado Hermético (DVH)	
		3.6W/m ² K ≥ U > 2.4W/m ² K	U ≤ 2.4W/m ² K
1	50%	60%	80%
2	40%	60%	80%
3	25%	60%	80%
4	21%	60%	75%
5	18%	51%	70%
6	14%	37%	55%
7	12%	28%	37%

La información presentada en esta tabla proviene de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC). (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 1992)

es la del U Ponderado, que consiste en la posibilidad de aumentar la superficie de ventanas únicamente si se aumenta el valor U de los muros de la envolvente, esto es posible solo para las zonas climáticas 3, 4, 5, 6 y 7, y para ventanas compuestas de vidrios monolíticos. Para cada zona, se deben cumplir los valores de la siguiente tabla (ver Tabla 7).

El método para obtener el valor U Ponderado consiste en una fórmula matemática donde se insertan en el numerador, valores de transmitancia de distintos muros de la envolvente, superficie de estos muros, transmitancia térmica de las ventanas y superficie de éstas. En el denominador se ubica la superficie total interior de los paramentos verticales de la envolvente. Esto debe ser igual al valor U Ponderado establecido en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** La fórmula del U Ponderado es la siguiente:

$$\frac{(SM_1 \times U_1) + (SM_2 \times U_2) + (SM_n \times U_n) + (SV \times UV)}{STE} = U \text{ Ponderado}$$

Donde:

- SM₁: Superficie Muro 1
- U₁: Transmitancia térmica del muro 1
- SM₂: Superficie Muro 2
- U₂: Transmitancia térmica del muro 2
- SV: Superficie de ventana
- UV: Transmitancia térmica de ventana
- STE: Superficie total de los paramentos verticales de la envolvente

La superficie de ventanas en el cálculo del U ponderado no podrá, en ningún caso, aumentar más de un 40 % respecto al porcentaje máximo de superficie señalado en la Tabla 6.

Tabla 7
Valores de U Ponderado para las Zonas 3, 4, 5, 6 y 7

Zona	U Ponderado, [W/m ² K]
3	2.88
4	2.56
5	2.36
6	1.76
7	1.22

La información presentada en esta tabla proviene de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC). (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 1992)

3.3. Normativas relacionadas a la ventilación⁵

Dentro de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC), hay 3 Artículos relacionados a la ventilación de locales habitables, estos son: el Artículo 4.1.2., el Artículo 4.1.3. y el Artículo 4.1.4. En éstos, se especifican distintas exigencias, las cuales se resumirán en los siguientes párrafos.

3.3.1. Artículo 4.1.2., OGUC.

Este artículo especifica que los locales habitables deberán tener, al menos, una ventana que permita la entrada de aire y luz del exterior, perpendicular a la superficie de esta ventana y hacia el interior, deberá haber un espacio libre de 1,5 metros si se trata de dormitorios. La ventana recién mencionada podrá ser fija únicamente si el recinto cuenta con un sistema de ventilación automatizado y si en este recinto no se utilizarán artefactos de combustión de cualquier tipo. Si el recinto es comercial o de oficinas y no está en contacto con el exterior, podrá no tener ventanas si cuenta con un sistema de climatización artificial.

3.3.2. Artículo 4.1.3., OGUC.

los baños, cocinas y lavaderos, cuando no contemplen ventana al exterior, deberán ventilarse mediante un ducto, individual o colectivo, de sección libre no interrumpida de, al menos, 0,16 m², reducible únicamente si se incluyen sistemas de tiraje forzado. Estos ductos serán de uso exclusivo para ventilación y deberán utilizarse ductos independientes para baños y cocinas.

La salida del ducto al exterior deberá sobresalir al menos 1 m de la cubierta y situarse a una distancia libre no menor a tres metros de cualquier elemento que entorpezca la ventilación por dos o más de sus costados.

3.3.3. Artículo 4.1.4., OGUC.

La ventilación de locales habitables de carácter industrial o comercial podrá efectuarse directamente hacia el exterior por aberturas hacia muros o techumbre, por las cuales deberá circular el aire libremente sin perjudicar recintos colindantes. El área mínima de estas aberturas no será inferior a la duodécima parte del área del piso del local. La ventilación de tales recintos puede efectuarse también por medios mecánicos que funcionen sin interrupción durante las horas de uso activo de la edificación.

⁵ Toda la información que se presenta bajo este título proviene de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC), específicamente de los Artículos 4.1.2., 4.1.3., y 4.1.4. (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 1992), y ha sido reducido mediante redacción propia con el fin de facilitar su lectura. Se pueden consultar los Artículos originales en los siguientes anexos de esta investigación: Anexo 3, Anexo 4 y Anexo 5.

Los locales comerciales que no cuenten con ventilación directa al exterior deberán ventilarse mediante conductos de sección mínima de 0.20 m². Cuando estos locales se destinen a usos que produzcan olores o emanaciones químicas, dicha ventilación deberá activarse por medios mecánicos durante las horas de uso activo de la edificación.

3.4. Aplicación del estándar Passivhaus en Chile

Como ya se determinó anteriormente, en Chile, desde la ciudad de Santiago hasta la ciudad de Puerto Montt, las zonas climáticas establecidas por el estándar son; clima Cálido hacia la costa y clima Cálido/Templado hacia la cordillera de los andes. En el documento ya citado “Criterios y algoritmos para componentes certificados Passivhaus” (Passive House Institute, 2015), además de establecer los valores de transmitancia térmica para componentes de ventanas y puertas de acuerdo a su zona climática, también establece los valores de transmitancia térmica que deben cumplir los componentes de la envolvente que den al exterior, es decir muros, techumbre y pisos ventilados, para estos tres el valor U es el mismo y también se determina de acuerdo a la zona climática donde esté emplazada la edificación.

Para efectos de este estudio, se tomará en cuenta la zona de clima más desfavorable para la zona centro-sur de Chile, el clima Cálido/Templado, que es donde está ubicada la ciudad de Santiago y la mayor parte de las grandes ciudades del sur de Chile como Rancagua, Talca, Concepción, Los Ángeles, Temuco, Valdivia, Osorno y Puerto Montt, entre otras.

3.4.1. Exigencias para el clima Cálido/Templado.

Para este clima, al igual que para todos los otros, el estándar exige que se cumplan los 5 principios ya explicados; que la envolvente esté aislada térmicamente, que esté sellada herméticamente, que tenga un diseño libre de puentes térmicos, que las ventanas y puertas sean las especificadas y que tenga un sistema de ventilación con recuperación de energía térmica. Pero para estos principios, este clima exige valores específicos de transmitancia térmica que se deben cumplir, los que se muestran en la siguiente tabla (ver Tabla 8).

3.4.2. El estándar Passivhaus frente a la normativa chilena.

Si se analizan los datos presentados, se puede concluir que las exigencias térmicas y de calidad del aire en el estándar Passivhaus son considerablemente más estrictas que las de la normativa chilena, es más, lo que se pide para el clima Cálido/Templado en el estándar, sería más que suficiente para edificar en la zona climática más extrema de la normativa chilena (la zona 7). La única exigencia de la normativa chilena que se mantiene y de la cual no hay mención en el estándar Passivhaus, es la exigencia sobre superficie máxima de ventanas en los paramentos verticales de la envolvente. Sobre esto no hay mención en el estándar simplemente porque los niveles de transmitancia que le

Tabla 8

Exigencias del estándar Passivhaus para transmitancias térmicas de ventanas y Envolverte sólida

Zona Climática	Valores U para ventanas \leq^1 [W/(m ² K)]	Valores U para Envolverte sólida \leq [W/(m ² K)]
1. Ártico	0.45 (0.35)	0.09
2. Frio	0.65 (0.52)	0.12
3. Frio/Templado	0.85 (0.70)	0.15
4. Cálido/Templado	1.05 (0.90)	0.25
5. Cálido	1.25 (1.10)	0.50
6. Caliente	1.25 (1.10)	0.50
7. Muy Caliente	1.05 (0.90)	0.25

¹ Los valores marcados entre paréntesis, corresponden al valor U de la zona vidriada del componente, mientras que el valor fuera de parentesis corresponde al valor U total del componente, incluyendo el marco.

La información presentada en esta tabla proviene del documento “Criterios y algoritmos para componentes certificados Passivhaus” (Passive House Institute, 2015).

exigen a las ventanas son tan bajos que la cantidad de ventanas que se instalen, no aportan a la pérdida de energía térmica desde el interior, es más, las ventanas en esos casos son tan buenos aislantes térmicos que el aporte en energía térmica entregado por la radiación solar a través de las ventanas es mayor a la pérdida de energía resultante de la diferencia de transmitancias térmicas entre los muros sólidos y las ventanas. Para simplificar, en una edificación Passivhaus, mientras mayor sea la superficie de ventanas orientadas hacia el sol, mayor es el aporte térmico, por ende, menor la cantidad de energía necesaria para calefaccionar.

De todas formas, la normativa térmica chilena se debe cumplir incluso si se está edificando bajo el estándar Passivhaus, por lo que si se analizan los mapas de zonas climáticas desarrollados por el MINVU⁶, se puede ver que la zona marcada por el estándar Passivhaus como clima Cálido/Templado, abarca 4 zonas de la normativa chilena, estas son: Zona 3 para las ciudades de Santiago y Rancagua, Zona 4 para Talca, Concepción y Los Ángeles, Zona 5 para Temuco, Valdivia y Osorno, y Zona 6 para la ciudad de Puerto Montt.

⁶ Estos mapas están disponibles para su descarga en la página web del MINVU (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2007) y se pueden consultar en el Anexo 2 de esta investigación.

La Tabla 6 dice que si las superficies vidriadas tienen un valor U menor a 2.4 W/m²K, las superficies máximas de ventanas con relación a la superficie interior de los paramentos verticales de la envolvente son: 80% para la Zona 3, 75% para la Zona 4, 70% para la Zona 5, y 55% para la Zona 6. El nivel U para las ventanas en el clima Cálido/Templado del estándar Passivhaus es de 1.05 W/m²K, lo que basta y sobra para entrar en la categoría de porcentajes recién mencionados, siendo éstos los que se deben considerar al edificar.

Para resumir, además de tener que cumplir los 5 principios básicos del estándar Passivhaus, las exigencias para edificar en las ciudades chilenas que ya se han mencionado, cumpliendo con el estándar Passivhaus y la normativa chilena, son las que se muestran en la siguiente tabla (ver Tabla 9).

Tabla 9

Exigencias de estándar Passivhaus y la normativa chilena para las 9 ciudades chilenas estudiadas

Ciudades chilenas a considerar	Valor U Ventanas ¹ ≤ [W/m ² K]	Valor U Envolvente sólida ≤ [W/m ² K]	Porcentaje máximo de superficie de ventanas ²
Santiago y Rancagua	1.05 (0.9)	0.25	80%
Talca, Concepción y Los Ángeles	1.05 (0.9)	0.25	75%
Temuco, Valdivia y Osorno	1.05 (0.9)	0.25	70%
Puerto Montt	1.05 (0.9)	0.25	55%

¹ Los valores entre paréntesis son para el elemento traslúcido de la ventana, los valores sin paréntesis incluyen el marco.

² Estos porcentajes son en relación a la superficie interior de los paramentos verticales de la envolvente.

La información presentada en esta tabla está basada en la OGUC (MINVU, 1992), y en el documento "Criterios y algoritmos para los componentes certificados Passivhaus" (PHI, 2015).

4. Proyecto de vivienda bajo el estándar Passivhaus en Chile

Con el propósito de evaluar la factibilidad del sistema Passivhaus en Chile, se presenta el siguiente proyecto de construcción de una vivienda unifamiliar, en el cual se desarrolló un sistema constructivo de madera que permite acatar las normas del estándar Passivhaus en sus 5 principios, y que por ende podría ser certificada por el Passivhaus Institut.

4.1. Parámetros de diseño⁷

El proyecto mencionado corresponde a la edificación de una vivienda unifamiliar ubicada en la ciudad de Santiago de Chile, esta edificación tendrá una superficie interior de 85 m², un piso de altura y estará construida en un sistema especial de tabiquerías de madera. La vivienda será habitada por una familia de 3 personas, 2 adultos y 1 niño, por lo que tendrá un programa interior de una cocina estilo americano, un living comedor, dos dormitorios, un baño y terraza.

A continuación, se muestran las planimetrías arquitectónicas del proyecto (Figuras de la 11 a la 18), e imágenes del modelo 3D (Figuras de la 19 a la 21).

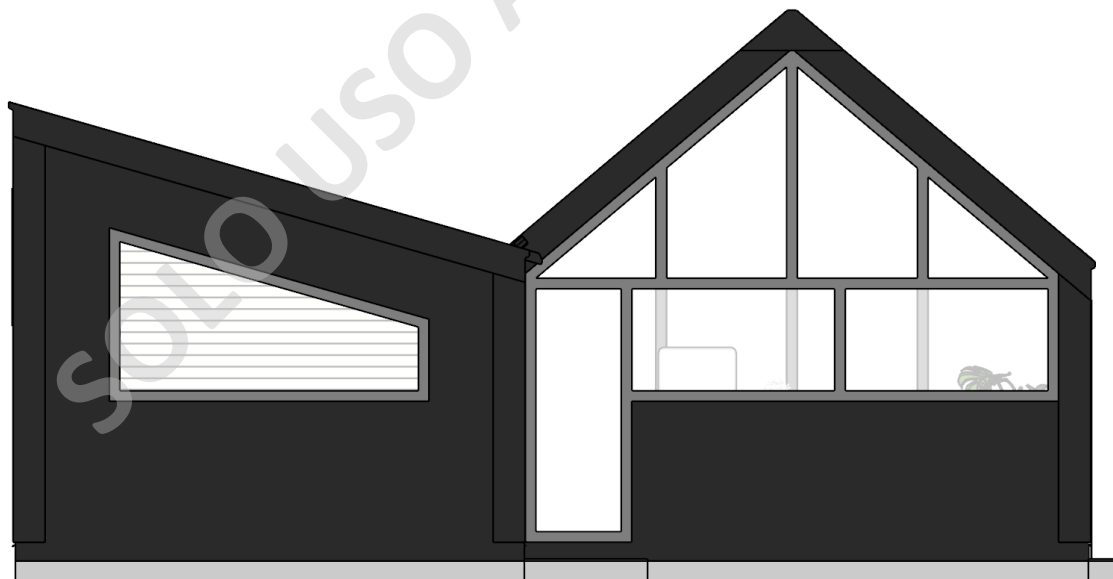


Figura 11, Elevación oriente

⁷ Todas las Figuras presentadas bajo este título son de elaboración propia.

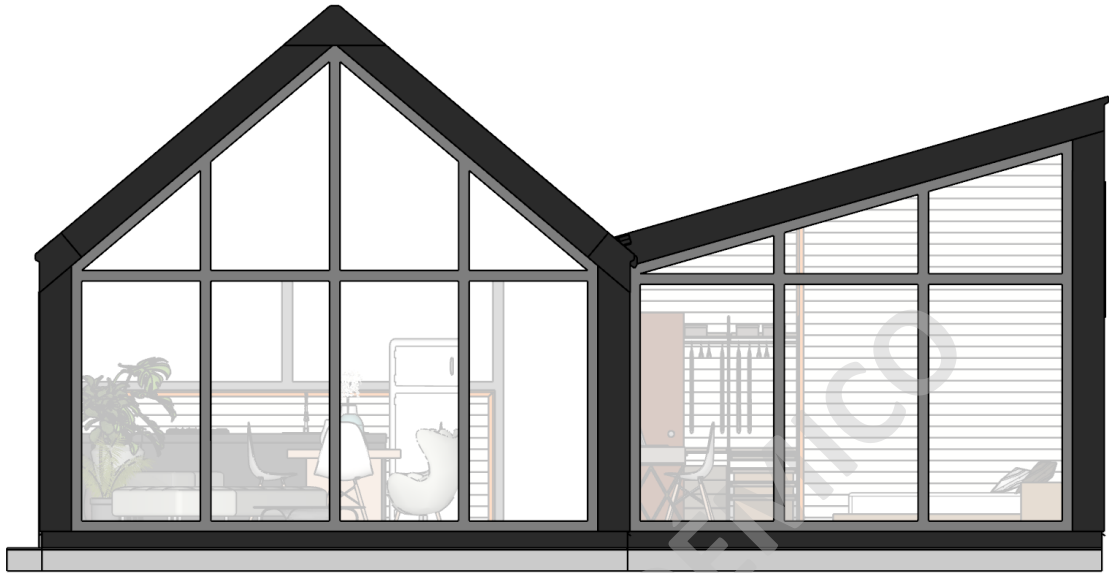


Figura 12, Elevación poniente



Figura 13, Elevación norte

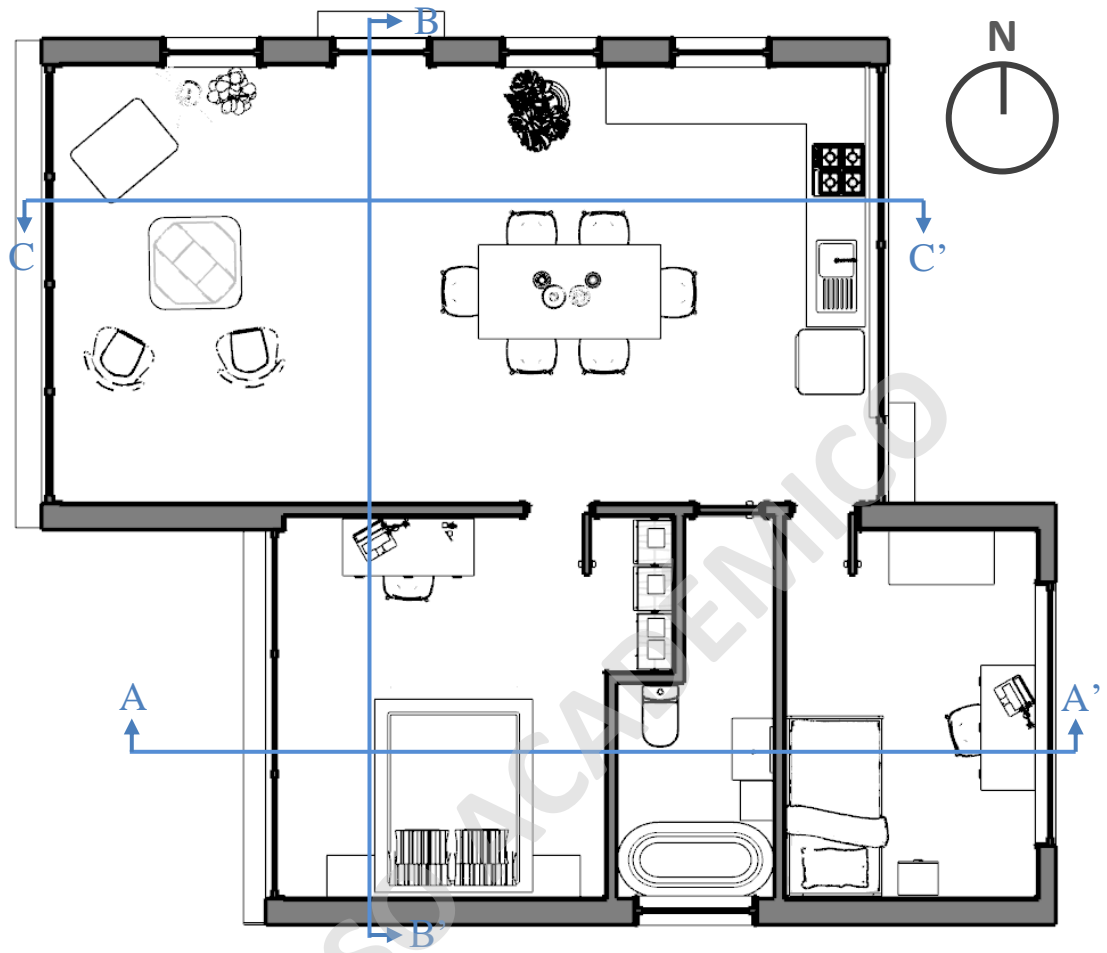


Figura 14, Planta de arquitectura

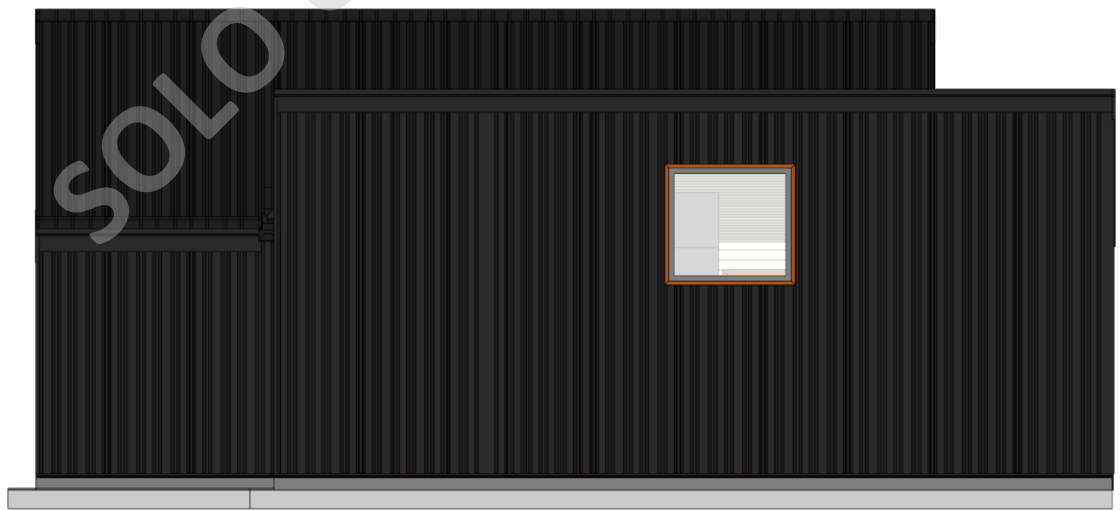


Figura 15, Elevación sur



Figura 16, Corte A-A'

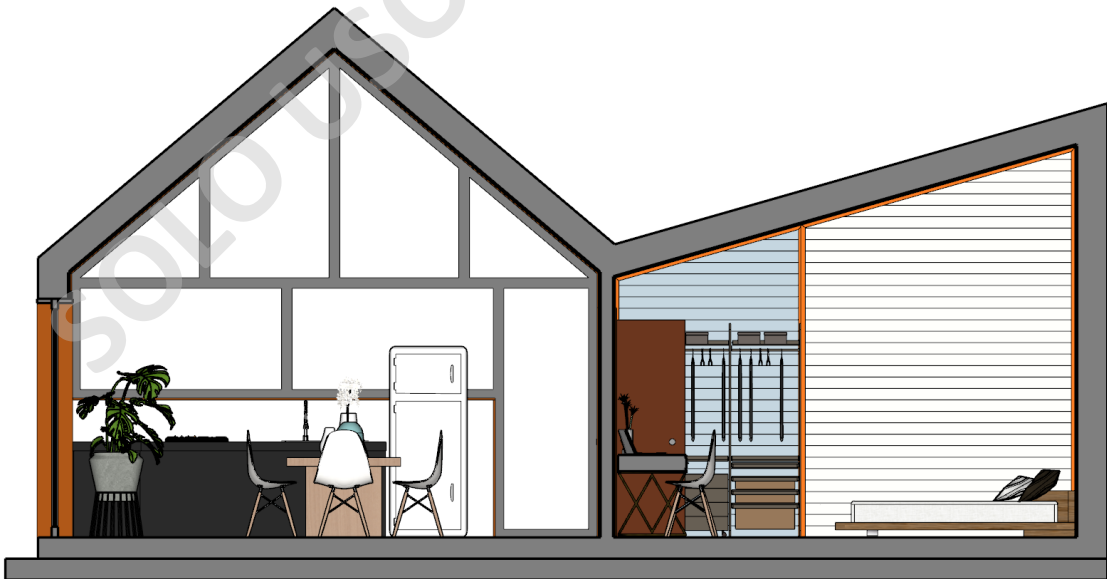


Figura 17, Corte B-B'



Figura 18, Corte C-C'



Figura 19, Imagen de modelo 3D, vista nor-poniente

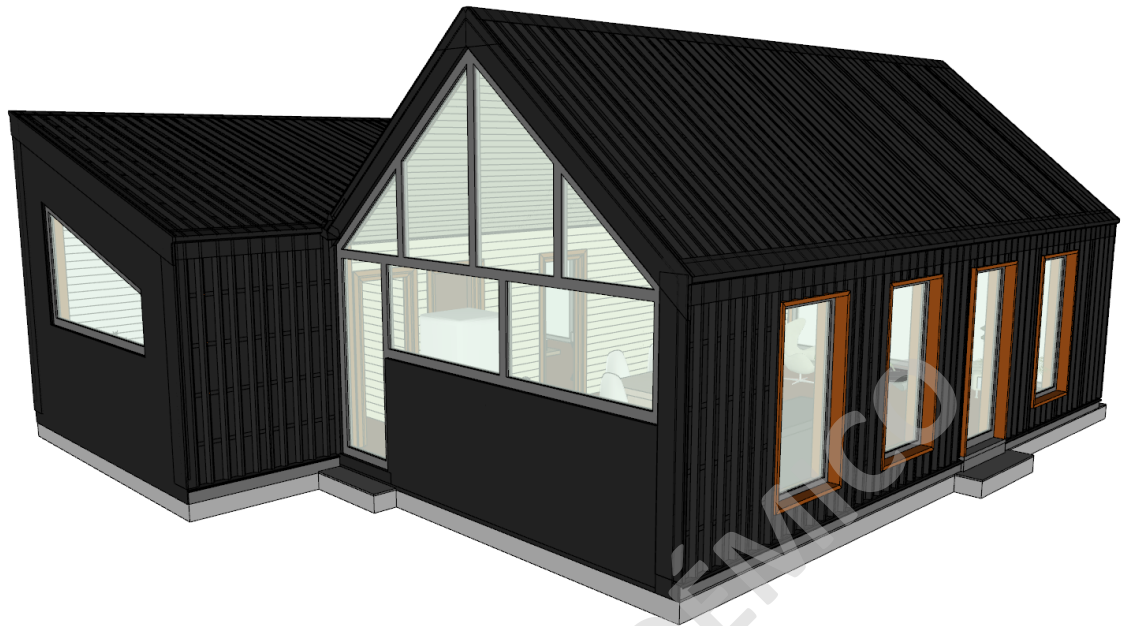


Figura 20, Imagen de modelo 3D, vista nor-oriente



Figura 21, Imagen de modelo 3D, vista sur-poniente

4.1.1. Diseño Compacto.

Como ya está explicado, el estándar Passivhaus sugiere que la edificación tenga un diseño compacto para mantener la temperatura interior de manera más eficiente. Para el caso del proyecto planteado se diseñó de la forma más compacta posible; se optó por una cocina integrada con el living y el comedor para así facilitar el flujo de temperatura y en vez de dos o tres espacios, se debe calefaccionar uno. Por otro lado, las habitaciones y el baño están en la otra área de la edificación, pero todos estos espacios están divididos del salón principal (living-comedor-cocina) mediante un tabique y puertas directas, por las cuales fluye el aire y la temperatura mediante conductos de ventilación libres.

4.1.2. Uso pasivo de la energía solar.

En el diseño creado se orientó el proyecto hacia el nor-poniente, dejando los grandes ventanales hacia el poniente y el área de ventanas y puerta principal translúcida hacia el norte. Se optó por esta orientación debido a que, en verano, si se orientaran los grandes ventanales hacia el norte, la radiación solar que ingresa sería muy fuerte y aumentaría considerablemente la temperatura interior. Pero a la vez, en invierno, el aporte por radiación solar llega desde el norte, y es por esto que de todas formas la cara norte de la edificación incluye ventanas bastante amplias. Aparte de la orientación, y para terminar de solucionar el problema, se añadió un sistema de celosías regulables en las ventanas de la cara norte y en el ventanal del poniente, de esta forma cuando es verano y no se requiere de ingreso de radiación, el usuario puede regular las celosías de tal forma que la radiación solar no ingrese, pero si la luz y también se permita la vista hacia el exterior. El concepto se muestra en los siguientes esquemas (ver Figuras de la 22 a la 24).

Cabe destacar que al proyecto se le añaden 3.9 m² de paneles fotovoltaicos para la generación de electricidad y 9 m² de panel colector solar plano para conectar al sistema HVAC (agua caliente sanitaria y calefacción).



Figura 22, Invierno, celosías levantadas permiten el ingreso de Radiación solar



Figura 23, Verano, Celosías permiten el ingreso de luz y la vista hacia el exterior pero bloquean la radiación solar directa



Figura 24, Día de verano por la tarde, celosías poniente bloquean parcialmente el ingreso de radiación solar.

4.2. Sistema Constructivo⁸

Para cumplir con los estrictos parámetros del estándar Passivhaus se diseñó un sistema constructivo especial de doble tabiquería de madera, con un diseño libre de puentes térmicos y dos capas de material aislante para cumplir con los requisitos térmicos. El sistema acoge y resuelve cada uno de los principios del estándar Passivhaus, a continuación, se detalla cómo se resolvió cada principio.

Para la aplicación de todos estos principios, es necesario capacitar a la mano de obra previamente a la fase constructiva en una capacitación especial donde se les enseñe cada uno de los principios y su método constructivo relacionado.

4.2.1. Aplicación del principio de envolvente térmica.

La transmitancia térmica de la envolvente requerida para una edificación bajo el estándar Passivhaus en Santiago de Chile es de $0.25 \text{ W/m}^2\text{K}$, lo que significa aproximadamente un espesor de 16 centímetros de lana de vidrio común en toda la envolvente. Pero la envolvente no puede estar hecha únicamente de material aislante, en algún lugar debe haber la estructura, por lo tanto, y considerando las otras limitaciones del estándar (que se explicarán más adelante), se llegó a la siguiente configuración de envolvente (Figura 25)

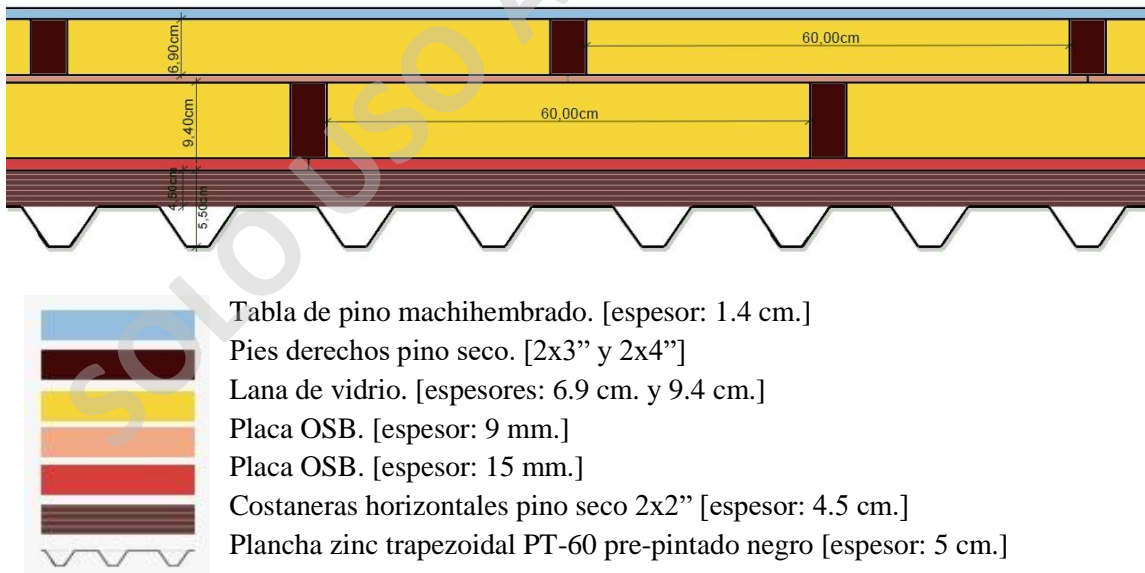


Figura 25, Configuración de materiales de la envolvente

⁸ Todas las figuras presentadas bajo este título son de elaboración propia.

Esta configuración se aplicó tanto para los muros como para la techumbre y se calculó su transmitancia térmica, el cálculo se muestra en la siguiente tabla (Tabla 10). En el cálculo se consideró una resistencia superficial interior (Rsi) de 0.13 y una resistencia superficial exterior (Rse) también de 0.13 ya que la fachada exterior es una fachada ventilada (una cámara de aire en circulación entre el panel OSB exterior y el zinc). El resultado final en transmitancia térmica del total de la configuración de muro da 0.226 W/m²K, lo que alcanza y sobra para cubrir los requerimientos del estándar.

Tabla 10
Cálculo de transmitancia térmica de la envolvente de la vivienda proyectada

Material	Espesor metros	Lambda	Ri m ² K/W	Rt m ² K/W	Ut W/m ² K
Placa OSB	0.015	0.12000	0.13		
Lana vidrio	0.094	0.04255	2.21		
Placa OSB	0.009	0.12000	0.08	4.425	0.226
Lana vidrio	0.069	0.04255	1.62		
Tabla madera	0.014	0.10400	0.13		

Los valores Lambda presentados en esta tabla provienen de especificaciones técnicas de cada producto.

El encuentro de los muros con el techo es en un ángulo especial, los pies derechos se unen con sus correspondientes piezas en la techumbre en ángulo y se afirman entre sí mediante pletinas metálicas, lo mismo ocurre con el material aislante, para explicarlo se muestra la siguiente figura (Figura 26). El aislante mantiene su espesor y no se ve interrumpido en el encuentro de muro y techo.

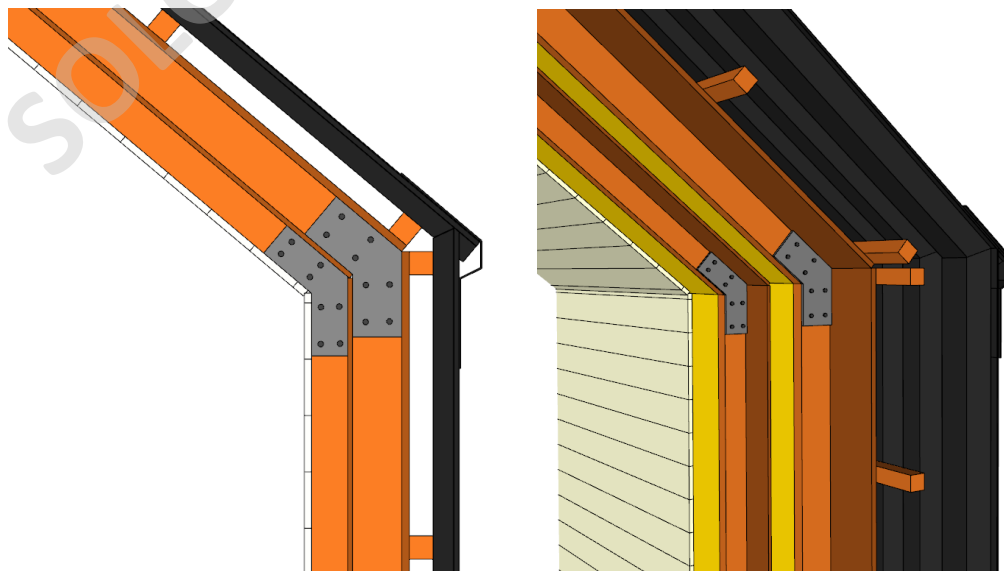


Figura 26, Detalle de encuentro de muro y techo

Para el encuentro del muro con el piso se utilizó un sistema obtenido del manual de soluciones constructivas “Das Passivhaus, Energie-Effizientes-Bauen” (Feist & Kaufmann, 2002), este encuentro ubica el tabique directamente sobre el radier y luego rellena el interior y el exterior con un material aislante denso. En este caso se utilizó como material aislante un poliestireno expandido de alta densidad (Figura 27).

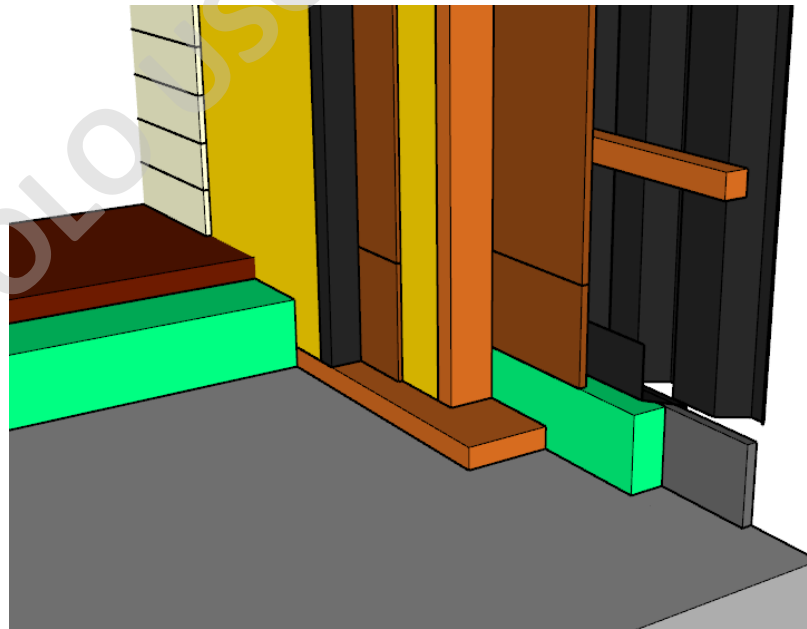
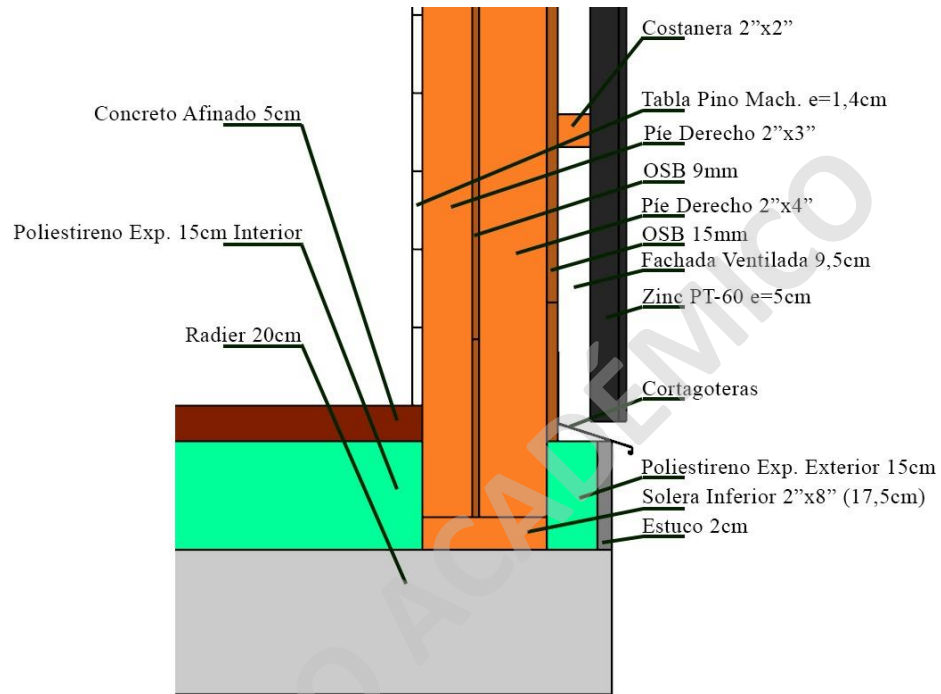


Figura 27, Detalle de encuentro entre piso y muro

4.2.2. Aplicación del principio de envolvente hermética.

El sistema constructivo cumple con este requisito utilizando una capa de OSB como límite hermético. El sistema está diseñado para que en el momento de la construcción se avance hasta llegar a la etapa de colocación de esta capa de OSB, y una vez instalada se deben sellar todas sus juntas con una cinta adhesiva especial de alta duración. Cuando la capa está completamente sellada se puede continuar con la construcción.

La capa hermética rodea sin interrupciones toda el área interior habitable tal cual lo especifica el estándar Passivhaus (línea roja) (Figura 28).

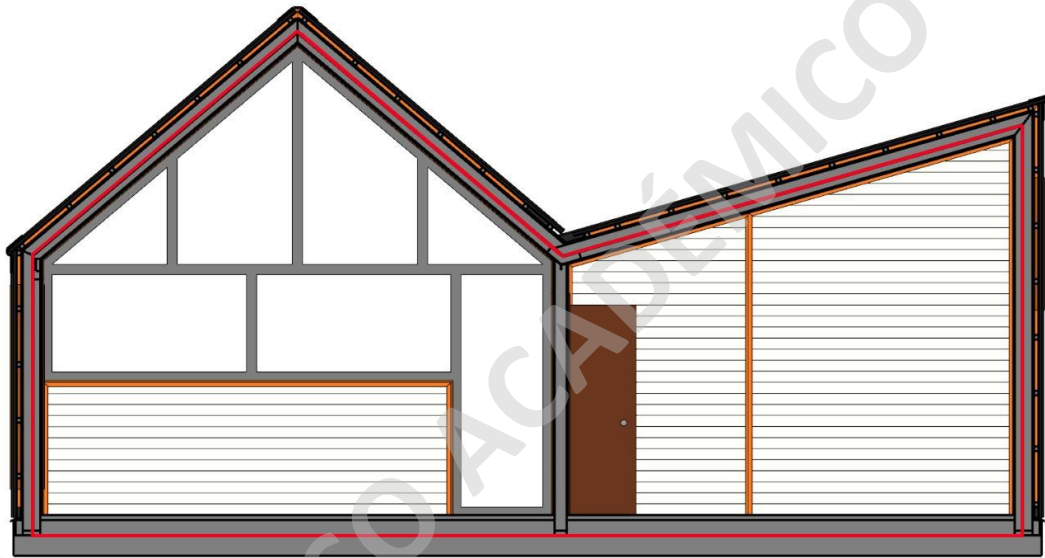


Figura 28, Capa OSB como límite hermético perimetral

Para que la capa hermética no sufriera interrupciones, en la unión con el tabique interior se diseñó un soporte especial de acero en “Y” que recibe ambas estructuras de techumbre y las conecta entre sí transfiriendo el peso hacia los pies derechos del tabique interior (Figura 29). Ambas vigas de la estructura de 2x3” se unen al soporte de acero mediante tirafondos desde abajo. Las vigas de la estructura de 2x4” se unen entre sí y descansan sobre una capa de poliestireno expandido de alta densidad, la que a su vez descansa sobre el soporte en “Y”.

Al ubicar la capa hermética en el centro del tabique doble, queda todo el espacio interior de la estructura de 2x3” como zona de ductos de ventilación, agua potable y electricidad, por lo que la capa hermética debe ser perforada únicamente para los ductos de ingreso y de extracción de aire.

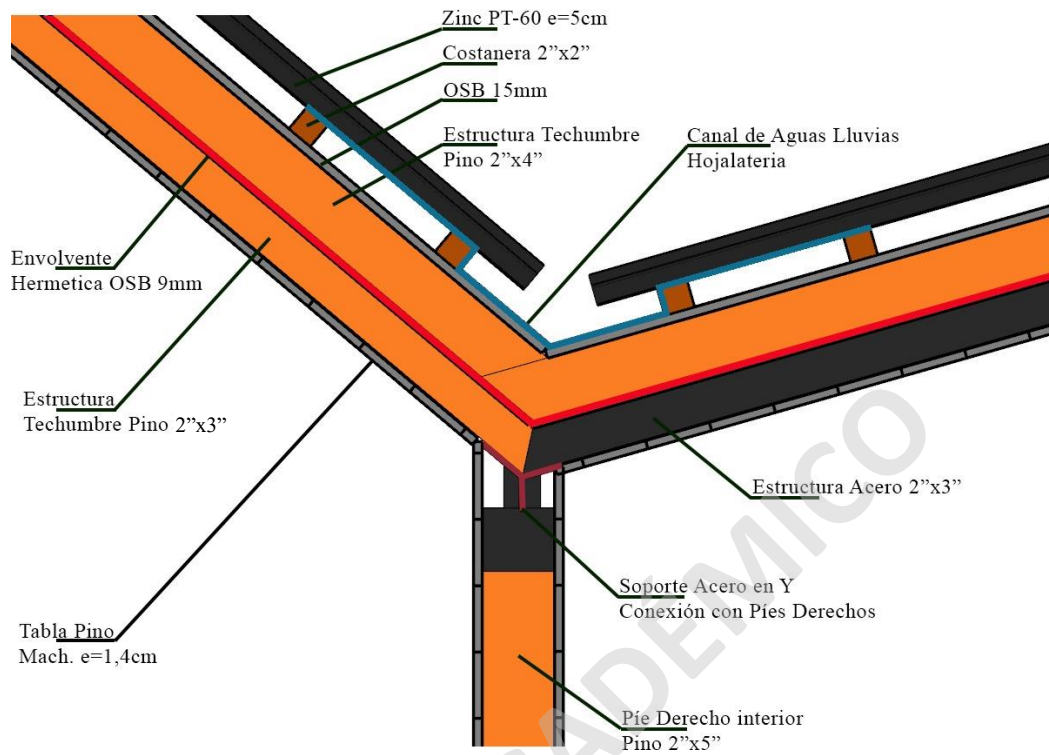


Figura 29, Detalle estructural de unión de techumbre con tabique interior

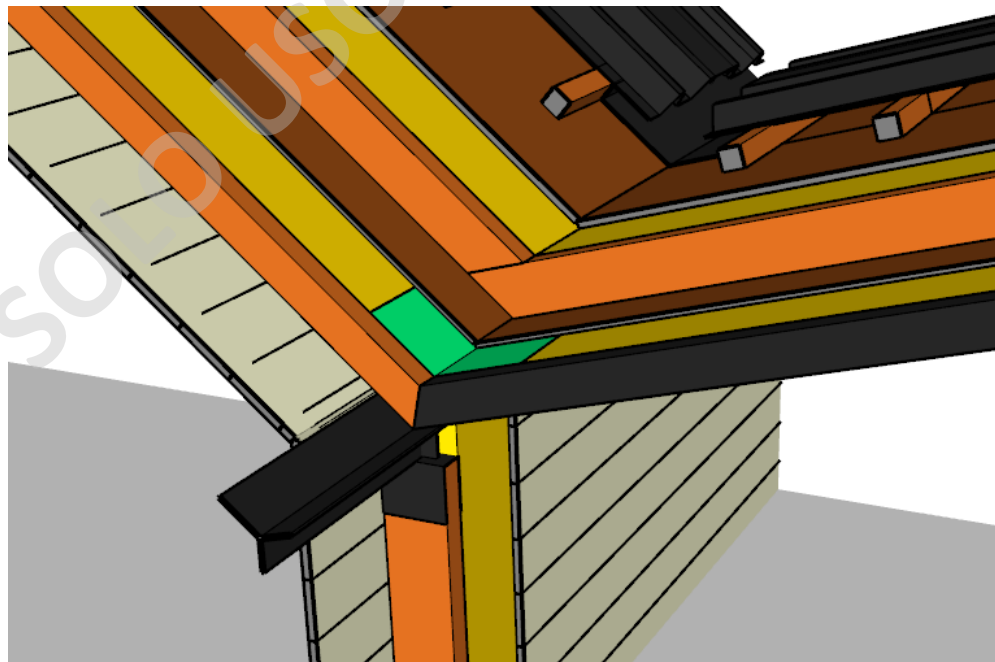


Figura 30, Detalle de soporte especial en "Y"

4.2.3. Diseño libre de puentes térmicos y unión con ventanas DVH.

El diseño libre de puentes térmicos es el principio más complejo de adaptar en un sistema de tabiquería de madera, es debido al cumplimiento de éste principio que la envolvente del proyecto es de tabique doble, ya que para evitar los puentes térmicos no puede haber ningún punto que conecte el exterior con el interior mediante madera sólida. En todo el sistema constructivo no hay ningún punto en que lo anterior ocurra, como se puede ver en la Figura 25 sobre la configuración básica de la envolvente, siempre la estructura de 2x3" se traslapa con la estructura de 2x4".

Los puntos más complejos son las esquinas y las uniones con ventanas, algunos detalles de esas uniones se muestran a continuación (Figuras de la 31 a la 36).

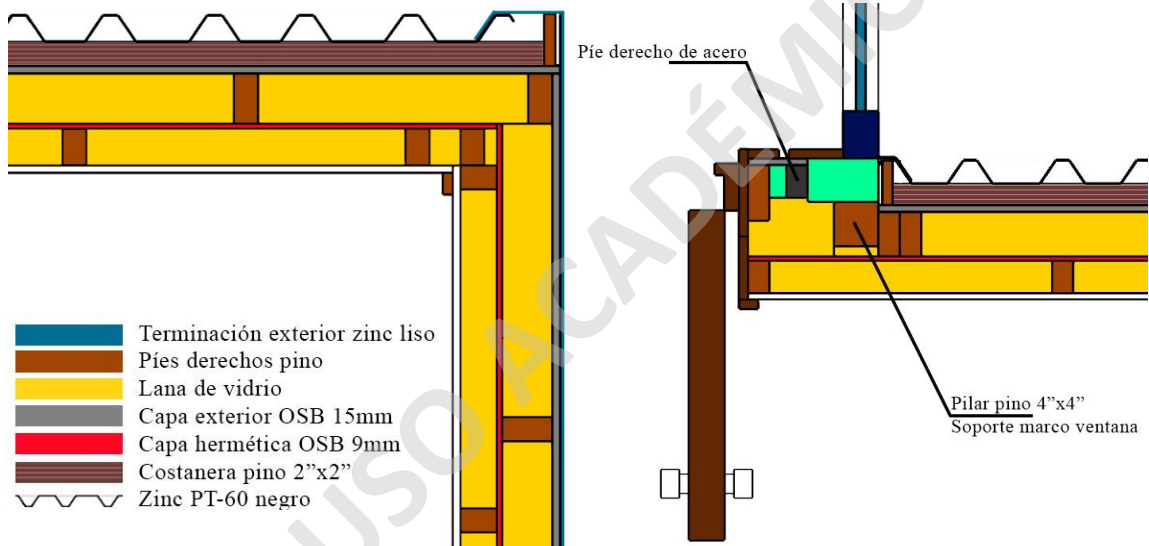


Figura 31, Detalle esquina simple en planta

Figura 32, Detalle unión con ventana en planta

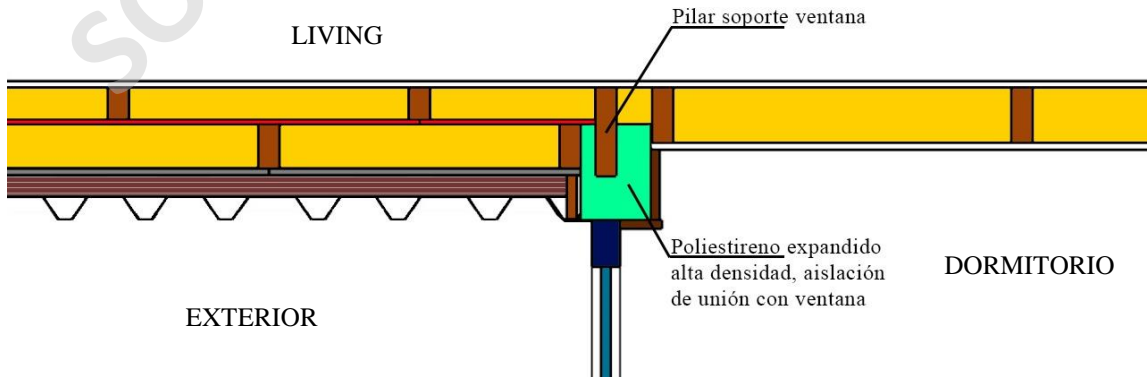


Figura 33, Detalle unión con ventana 2, en planta

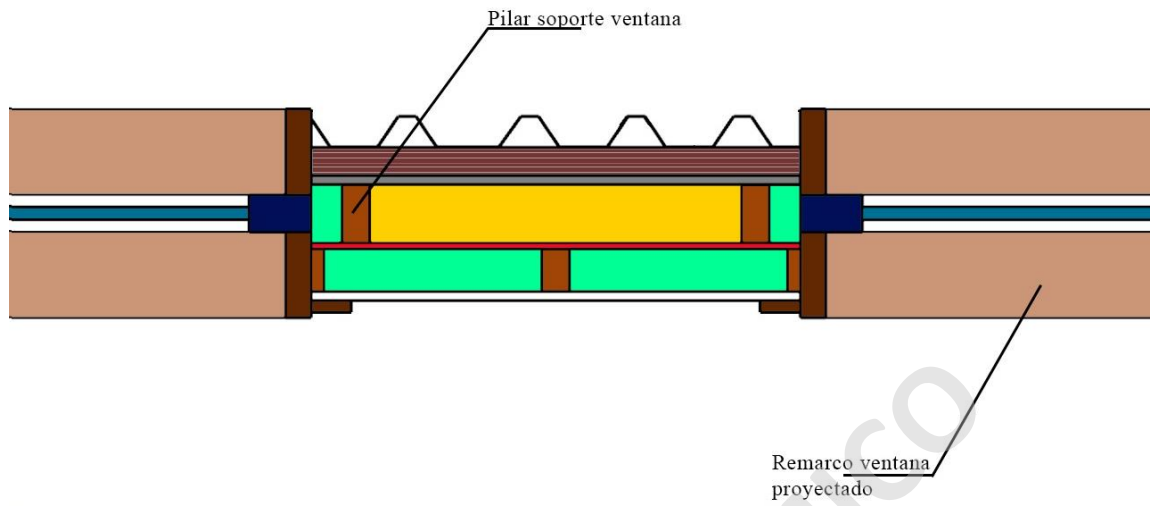


Figura 34, Detalle ventanas norte en planta

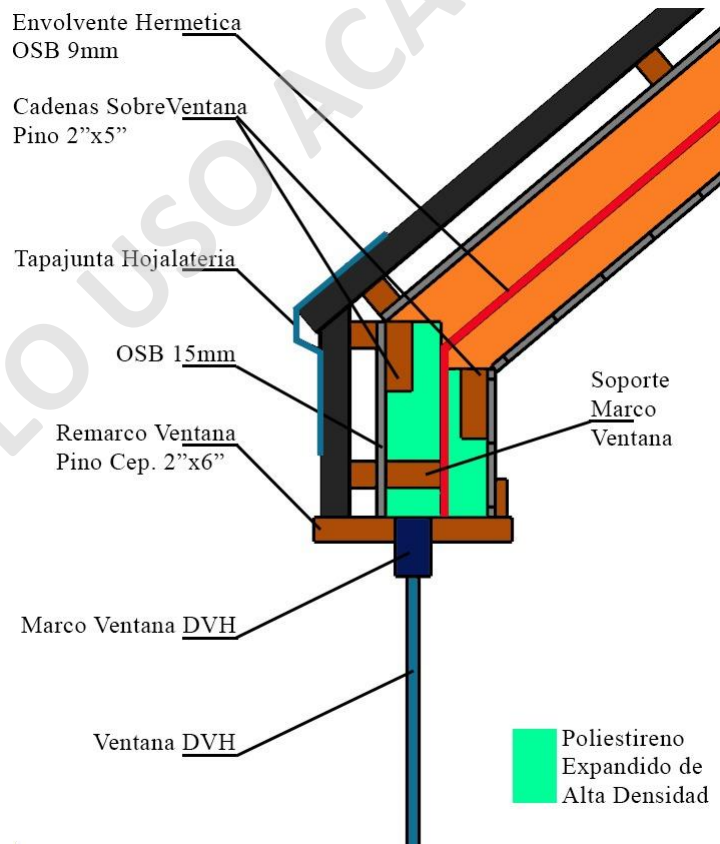


Figura 35, Detalle superior ventanas norte en corte

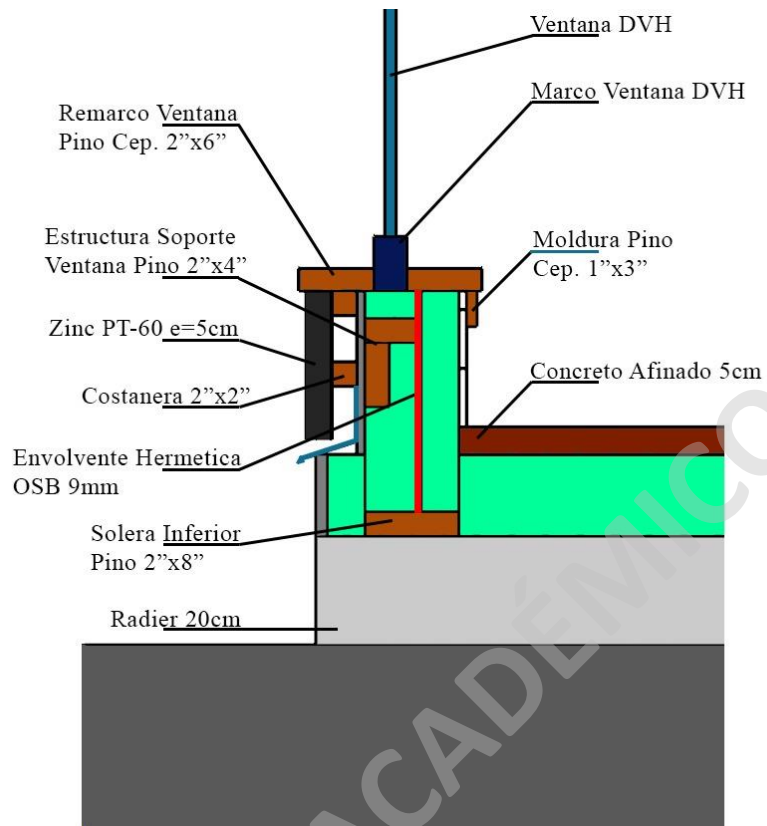


Figura 36, Detalle inferior ventanas norte en corte

4.2.4. Aplicación del principio de ventanas y puertas pasivas.

Sobre este punto es suficiente mencionar que el proyecto incluye las ventanas y puertas necesarias, se encargarán a una empresa especializada las ventanas y puertas vidriadas con una transmitancia térmica total no mayor a $1.05 \text{ W/m}^2\text{K}$.

La superficie total de ventanas del proyecto es un 45.4% en relación a la superficie interior de los paramentos verticales de la envolvente, un 34.5% por debajo del máximo permitido por la norma (80%).

Sobre la unión de los muros con las ventanas y puertas, en los detalles constructivos que se presentaron anteriormente se pueden ver las soluciones, en ellas queda claro que todos los marcos de ventana están instalados sobre una pieza de poliestireno expandido de alta densidad y que por ende el marco nunca está en contacto directo con madera, evitando así uno de los puentes térmicos más frecuentes.

4.2.5. Aplicación del principio de ventilación con recuperación de energía.

Para este principio también es suficiente mencionar que el proyecto utilizará un sistema HVAC con una unidad compacta de bomba de calor tal cual se menciona en los capítulos anteriores. Ésta unidad está en el mercado de forma independiente al recuperador de calor a contracorriente, ambas se cotizaron y son compatibles una con otra, el sistema completo tiene un valor de \$4.355.750 y fue añadido al análisis de precio unitario que se muestra más adelante.

Los ductos de ventilación, al ser una edificación con diseño compacto, no deben recorrer muchas distancias, como se muestra en la siguiente figura (Figura 37), el sistema de ventilación, termos y bomba de calor se ubicarán en una zona exterior designada para eso y los ductos circularán por el tabique divisor interior, ingresando al espacio interior por dentro del radier, por lo que no perjudican la capa hermética.

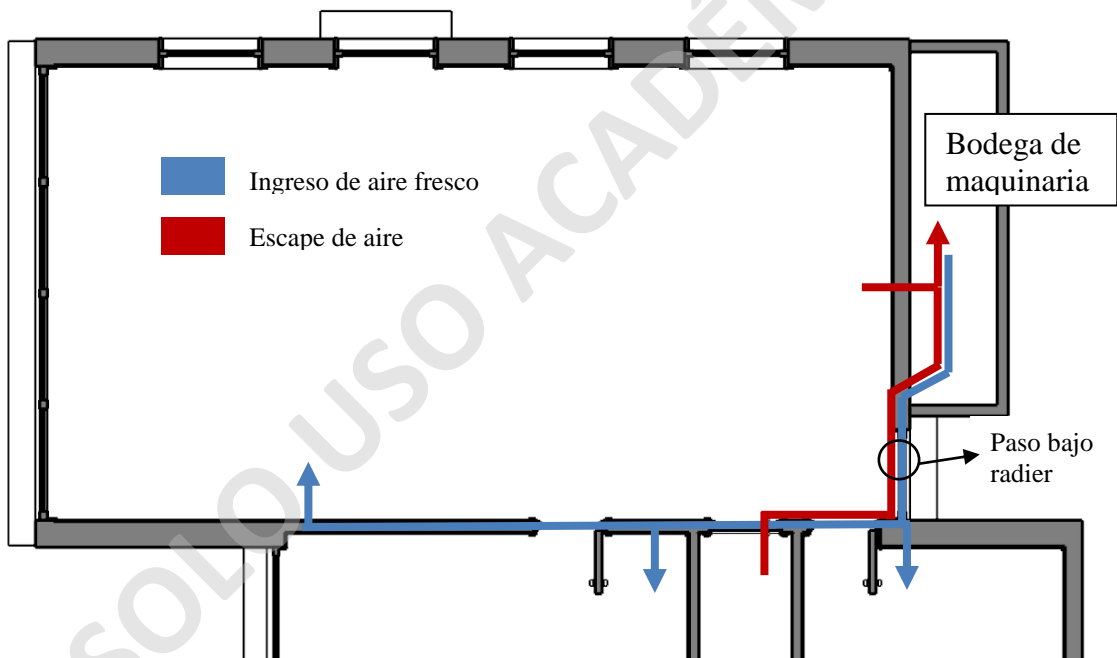


Figura 37, Esquema en planta de ductos de ventilación

4.2.6. Esquema de edificación.

Para mostrar el proyecto de mejor manera se muestra a continuación una seguidilla de imágenes del modelo 3D que muestran el proceso constructivo del proyecto (Figuras de la 38 a la 41).



Figura 38, Esquema de edificación 1

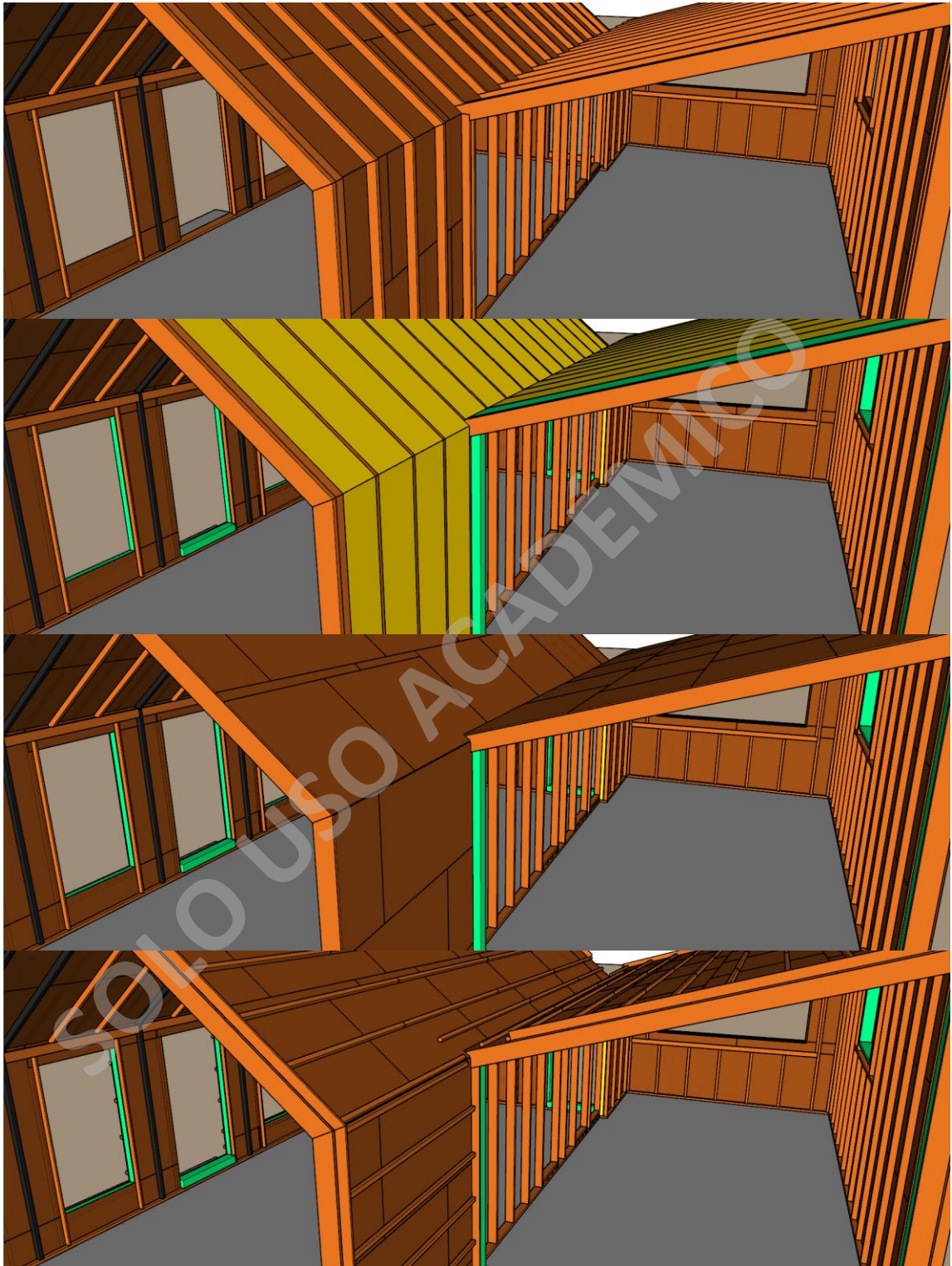


Figura 39, Esquema de edificación 2

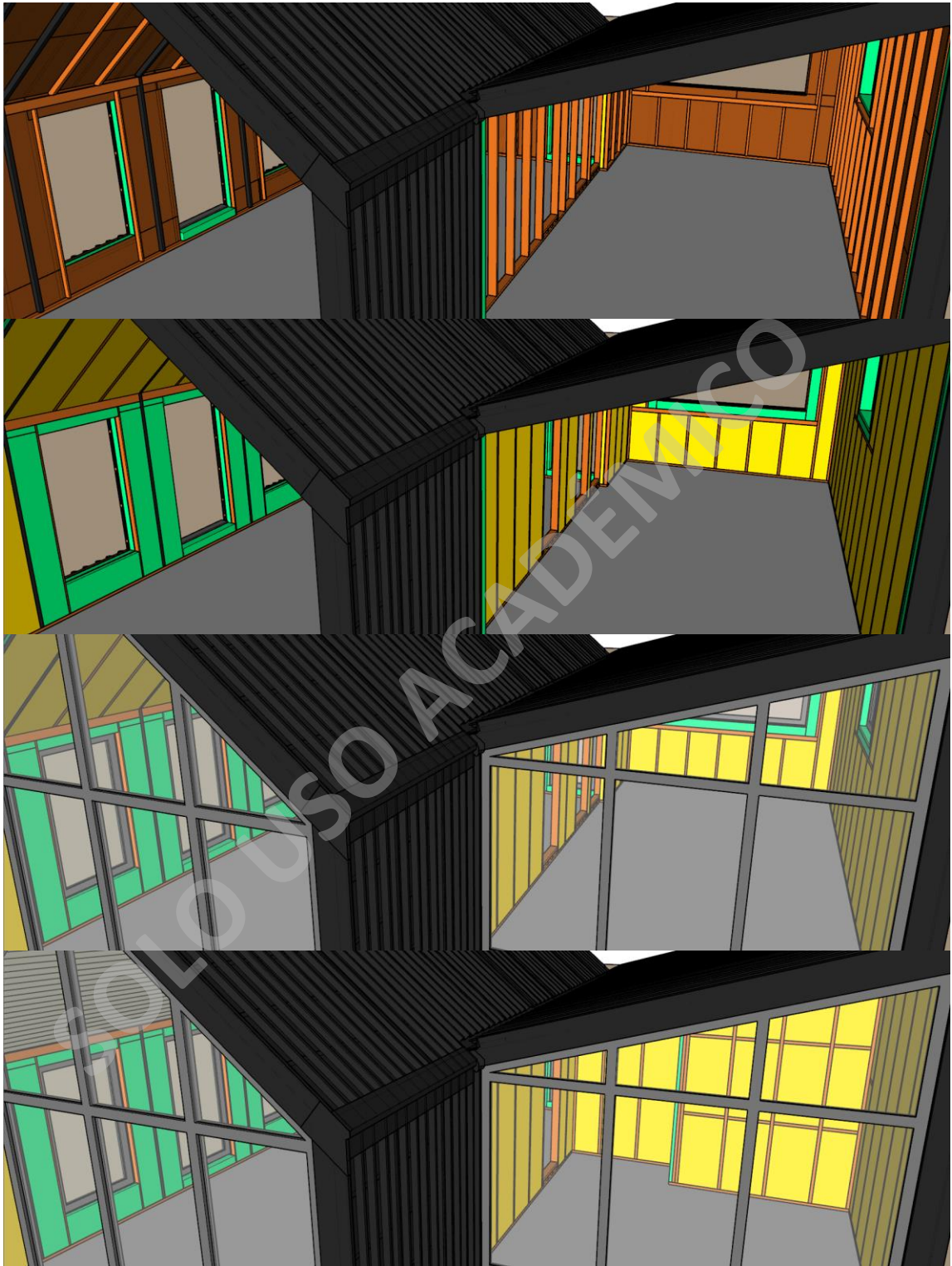


Figura 40, Esquema de edificación 3

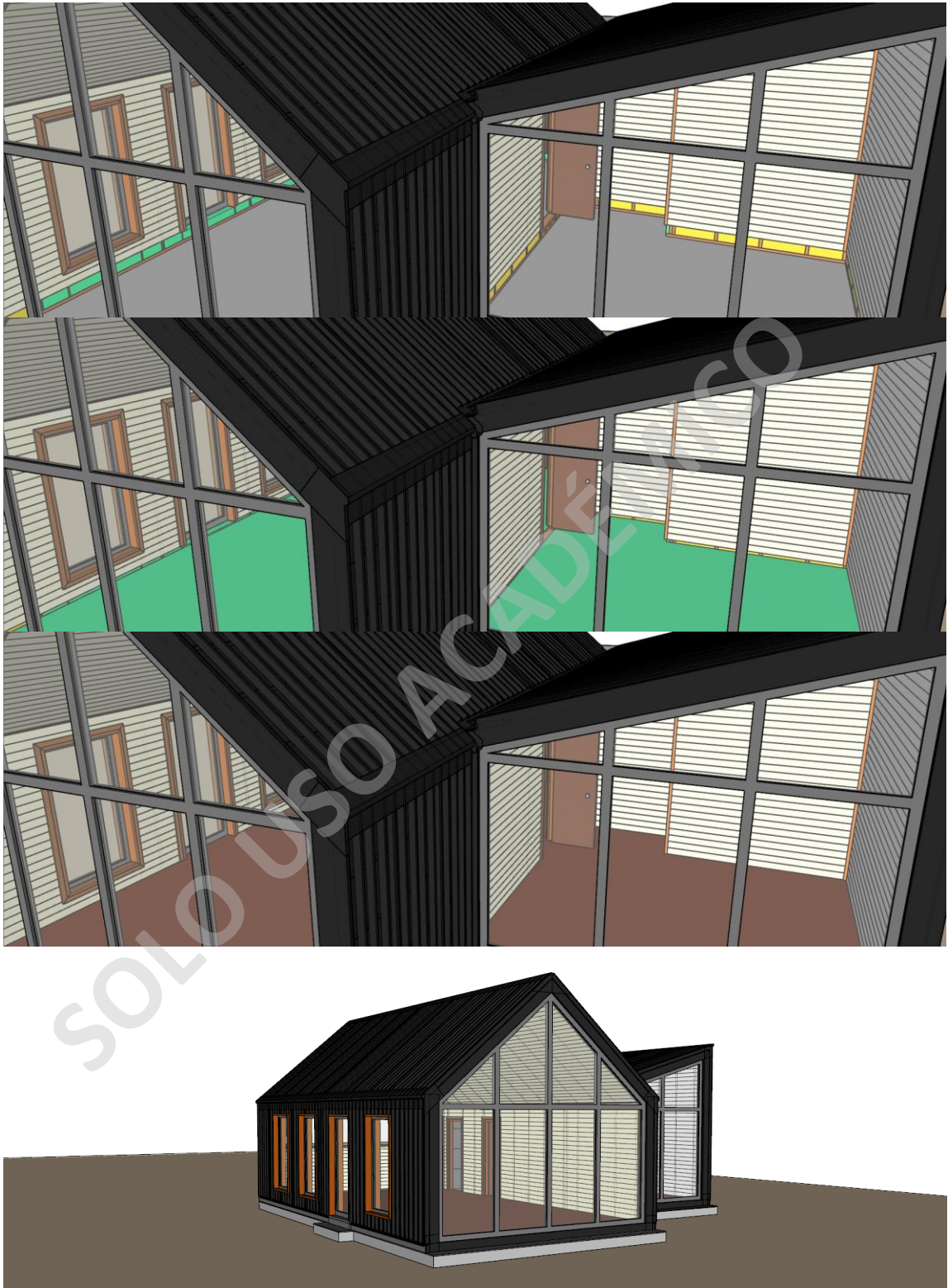


Figura 41, Esquema de edificación 4

4.3. Calificación energética de viviendas

Para poder tener una idea más clara del consumo energético, y para confirmar que se cumplía con el requisito más importante del estándar Passivhaus (el de no tener un consumo energético mayor a 15 kWh/m² al año), el proyecto se sometió al programa de calificación energética de viviendas (CEV) y se obtuvo así un valor en porcentaje de ahorro de energía, una calificación y lo más importante, un valor de consumo energético estimado al año. La etiqueta de calificación se muestra en la siguiente figura (Figura 42).

1.- Etiqueta	
Tipo de Calificación	1 Calificación Energética
Informe de evaluación N°	2
Región	RM
Dirección	3 Sin dirección
Comuna	4 Peñalolén
Rol vivienda	5 No tiene rol
Tipo de vivienda	6 Casa aislada
Superficie interior útil	7 85.00
Zona térmica	8 Zona 3 - A
Calificación energética de arquitectura	9 A
Requerimientos de energía	10 (kWh/ m ² año)
Ahorro de energía	84.9%
Comentario eventual en el caso que no se evalué la calefacción	11
Calificación energética de arquitectura + equipos + tipo de energético	12 A
Requerimientos de energía	13 13.6 (kWh/ m ² año)
Ahorro de energía	96.3%
Fecha de emisión	14
Fecha de vencimiento	15
Versión del procedimiento oficial de calificación energética	16 1

Figura 42, Etiqueta de calificación energética de vivienda. Fuente CEV 1.0

Como se puede ver en la etiqueta, se obtuvo una calificación energética “A” para la arquitectura, equipos y tipo energético, Un 96.3% de ahorro de energía y un requerimiento de 13.6 kWh/m² al año, entrando así en el estándar Passivhaus sin problemas.

4.4. Análisis de costos

Para poder evaluar correctamente el proyecto en el área financiera, se realizó un extenso análisis de precio unitario sobre el proyecto completo, para esto se utilizó el modelo 3D como base de cálculo ya que dicho modelo se realizó a detalle de tal manera que incluyera cada uno de los materiales de construcción. La mano de obra y los valores de cada material se calcularon con la ayuda de la página web “Generador de precios Chile” (CYPE ingenieros S.A., 2018), la cual proporciona valores actualizados de materiales y de la mano de obra necesaria para realizar distintas partidas, además del tiempo que demorarán dichas partidas.

A continuación, se muestra el análisis de precios unitarios dividido en 2 planillas Excel (Figura 43 y Figura 44).

Presupuesto Mano de obra		Duración en Días	Cantidad Hombres	Mano de obra
Valor Hombre Día	\$ 32.000			
Obras Preliminares				
Topografía y nivelación de terreno		10.00	6	\$ 1.920.000
Limpieza y trazado		2.00	2	\$ 128.000
Obra Gruesa				
Fundaciones y Radier		25.00	3	\$ 2.400.000
Estructura 2x3" y capa hermética OSB 9mm		25.00	3	\$ 2.400.000
Estructura 2x4" y Aislación 4"		25.00	3	\$ 2.400.000
OSB 15mm y costaneras		10.00	4	\$ 1.280.000
Aislación 3" y tabiquería interior		15.00	2	\$ 960.000
Techumbre		20.00	4	\$ 2.560.000
Terminaciones				
Ventanas y Puertas exteriores		3.00	4	\$ 384.000
Entablado interior y terminaciones baño y cocina		20.00	4	\$ 2.560.000
Pintura blanca entablado interior		5.00	4	\$ 640.000
Remarcos, Puertas interiores, y tapajuntas		2.00	4	\$ 256.000
Aislación Piso y concreto afinado		25.00	4	\$ 3.200.000
Instalaciones				
Ductos de Ventilación		2.00	2	\$ 128.000
Redes de Gas, electricidad y agua certif.		15.00	4	\$ 1.920.000
Bodega exterior baja de máquinas		5.00	2	\$ 320.000
Instalación Sistema HVAC		3.00	3.5	\$ 336.000
Limpieza general de cierre		1.00	2	\$ 64.000
Total precio mano de obra				\$ 23.856.000

Figura 43, Análisis de precios unitarios del proyecto, parte 1. Elaboración propia

Presupuesto Materiales		Valor por m2	Valor Total
Obra Gruesa			
Fundaciones y Radier		\$ 28.425	\$ 2.416.150
Estructura 2x3" y capa hermética OSB 9mm		\$ 32.995	\$ 2.804.579
Estructura 2x4" y Aislación 4"		\$ 10.913	\$ 927.637
OSB 15mm y costaneras		\$ 11.963	\$ 1.016.859
Aislación 3" y tabiquería interior		\$ 1.804	\$ 153.312
Techumbre		\$ 12.282	\$ 1.043.928
	Sub total:		\$ 8.362.465
Terminaciones			
Ventanas y Puertas exteriores		\$ 357.500	\$ 30.387.500
Entablado interior y terminaciones baño y cocina		\$ 97.420	\$ 8.280.704
Pintura blanca entablado interior		\$ 1.625	\$ 138.100
Remarcos, Puertas interiores, y tapajuntas		\$ 4.001	\$ 340.076
Aislación Piso y concreto afinado		\$ 23.764	\$ 2.019.930
	Sub total:		\$ 41.166.309
Instalaciones			
Ductos de Ventilación		\$ 505	\$ 42.900
Redes de Gas, electricidad y agua certif.		\$ 10.876	\$ 924.419
Bodega exterior baja de máquinas		\$ 4.918	\$ 418.000
Sistema HVAC + panel fotovoltaico + colector solar		\$ 71.297	\$ 6.060.232
Limpieza general de cierre		\$ 110	\$ 9.350
	Sub total:		\$ 7.454.901
Total Materiales			\$ 56.983.675

Análisis de precios unitarios	M2 del proyecto	Valor por M2	Valor Total
	85		
Mano de Obra		\$ 280.659	\$ 23.856.000
Materiales		\$ 670.396	\$ 56.983.675
Sub Total		\$ 951.055	\$ 80.839.675
Gastos generales, gastos legales y honorarios empresa	15%	\$ 142.658	\$ 12.125.951
Gastos Financieros	12%	\$ 114.127	\$ 9.700.761
Total Construcción		\$ 1.207.840	\$ 102.666.387
Valor Terreno		\$ 213.992	\$ 87.522.728
Utilidad Constructora	20%	\$ 241.568	\$ 20.533.277
Impuesto a la venta	25%	\$ 60.392	\$ 5.133.319
IVA	19%	\$ 315.323	\$ 36.023.790
Valor de venta casa		\$ 2.039.115	\$ 251.879.501
Valores en UF		UF 76.2	UF 9416

Valor terreno por m2	8 UF	Valor UF	Duración Obra
Tamaño terreno	409 M2	\$ 26.749	11 meses

Figura 44, Análisis de precios unitarios del proyecto, parte 2. Elaboración propia

Para la elaboración del Análisis de precios unitarios y el posterior estudio de mercado, se ubicó geográficamente el proyecto en un mega-condominio urbanizado de viviendas unifamiliares en Peñalolén llamado “Arboretum”. Éste condominio abarca varias hectáreas de terreno en pie de montaña y está en constante crecimiento. Dentro del condominio se ofrecen muchos terrenos de distintos tamaños, algunos lo suficientemente grandes para que inmobiliarias desarrollaran sub-condominios y vendieran viviendas entre los 140 y 190 m². Son esas viviendas las que representarán el papel de la competencia en el estudio de mercado que se mostrará más adelante.

El proyecto utiliza como terreno un sitio en venta de 409 m², este sitio está ubicado dentro del condominio “Arboretum” y tiene un valor de 8 UF por metro cuadrado.

Del Análisis de precios unitarios se pueden extraer varios datos, pero lo que vale la pena destacar es que el proyecto tiene ese valor debido a que es una Passivhaus, lo que es un valor agregado como ningún otro atributo. Se ve en el Análisis el notorio gasto en ventanas y puertas exteriores. Estas puertas y ventanas ubicadas en la envolvente de la vivienda tienen ese valor porque son muy especiales, tienen un valor U de 1.0 W/m²K y no se venden en Chile, ese valor se extrajo de una cotización a una empresa alemana que las importa y ahí su elevado valor. Otro notorio gasto es el sistema HVAC + los paneles fotovoltaicos y colectores solares.

4.5. Estudio de mercado

Para tener un punto de comparación en cuanto a valores, se realizó un estudio de mercado que recoge los valores de la “competencia” inmobiliaria en la zona donde se ubicó el proyecto.

Se analizaron los 4 proyectos de inmobiliarias que estaban activos y en venta, de los cuales se obtuvo información mediante contacto directo con agentes de venta. Los 4 proyectos, con sus respectivos datos relevantes se pueden ver en la siguiente Tabla (Tabla 11). En dicha Tabla, se añadió una fila donde se realiza un promedio de las superficies y de los valores de los proyectos inmobiliarios analizados, si se compara ese promedio con los valores del proyecto Passivhaus que se plantea en esta investigación, se puede ver que el proyecto no es tanto más costoso que el promedio de la competencia; los valores arrojados por el análisis de costos indican que el proyecto tiene un valor por metro cuadrado de 76.2 UF mientras que el promedio de la competencia es de 75.8 UF, es decir, apenas 0.4 UF de diferencia por metro cuadrado edificado.

Tabla 11

Superficies y valores de los proyectos de inmobiliarias dentro del condominio Arboretum

Proyecto Inmobiliario	Superficie Construida m ²	Superficie Terreno m ²	Valor Total UF	Valor m ² UF
Las Raíces de Arboretum	186.6	523.1	13067	70.0
Mirador de Arboretum	140	402	11634	83.1
Piedras de Arboretum	139.7	377.2	10731	76.8
Condominio Mirador	139.7	184.8	10215	73.1
Promedio Proyectos	151.5	371.8	11411.8	75.8

La información presentada en esta tabla fue proporcionada por las inmobiliarias de cada proyecto.

4.6. Valor económico añadido del estándar Passivhaus

Si se quitan los valores de sistemas HVAC, los valores añadidos de las ventanas y puertas pasivas, además del costo extra en aislación y en estructura al engrosar la envolvente, se puede determinar, aproximadamente, cuánto más barato sería construir la misma vivienda sin estándar Passivhaus, y asimismo determinar cuánto más costoso es realmente construir bajo el estándar Passivhaus, dicho análisis se realizó y se muestra el resultado en la siguiente planilla (Figura 45).

Análisis de precios unitarios	M2 del proyecto		Valor por M2	Valor Total
		85		
Mano de Obra			\$ 256.376	\$ 21.792.000
Materiales			\$ 348.345	\$ 29.609.293
Sub Total			\$ 604.721	\$ 51.401.293
Gastos generales, gastos legales y honorarios empresa	15%		\$ 90.708	\$ 7.710.194
Gastos Financieros	12%		\$ 72.567	\$ 6.168.155
Total Construcción			\$ 767.996	\$ 65.279.642
Valor Terreno			\$ 213.992	\$ 87.522.728
Utilidad Constructora		20%	\$ 153.599	\$ 13.055.928
Impuesto a la venta		25%	\$ 38.400	\$ 3.263.982
IVA		19%	\$ 210.860	\$ 27.144.438
Valor de venta casa			\$ 1.384.847	\$ 196.266.719
Valores en UF			UF 51.8	UF 7337

Valor terreno por m2	8 UF	Valor UF	Duración Obra
Tamaño terreno	409 M2	\$ 26.749	11 meses

Figura 45, Análisis de valor de vivienda sin los componentes Passivhaus

Como se ve en la figura anterior, al quitarle los componentes que hacen que la vivienda esté bajo el estándar Passivhaus, el valor final de la vivienda disminuye considerablemente. Antes tenía un valor total de 9416 UF y ahora disminuyó a 7337 UF, es decir 2079 UF menos.

Cabe destacar que al disminuir los costos de construcción también disminuyen las utilidades de la empresa, los gastos generales y legales, los gastos financieros y los impuestos, por lo que esos 2079 UF no son únicamente costos físicos de componentes Passivhaus, sino que también son ingresos que la hipotética empresa constructora dejaría de recibir.

Ahora, para realizar un estudio más acertado, no corresponde simplemente utilizar el valor de 2079 UF y tomarlo como la diferencia entre una vivienda sin estándar Passivhaus y otra con, ya que como se vio en el estudio de mercado, queda claro que la competencia vende un producto similar, pero sin estándar Passivhaus a casi el mismo valor. De esta forma, es lógico pensar en esos 2079 UF como un valor que las inmobiliarias de la competencia están absorbiendo a modo de utilidades.

SOLO USO ACADÉMICO

5. Conclusiones

Si bien al comparar el proyecto Passivhaus planteado con viviendas de la competencia no hay mayor diferencia económica en el valor por metro cuadrado, si la hay en cuanto lo que el proyecto en sí está entregando. Por todo lo que se ha explicado en esta investigación, se da por entendido que una vivienda bajo el estándar Passivhaus tiene muchos beneficios; otorga una temperatura confortable constantemente, automatiza todos los sistemas de calefacción, mantiene siempre el aire fresco dentro de la vivienda y, lo más importante, reduce el gasto energético en un 90% o más, lo que se traduce en una reducción importantísima de la huella de carbono. Es éste el punto que más validez tiene el estándar Passivhaus, y su mismo nombre lo dice, una vivienda pasiva. ¿Por qué seguir consumiendo combustibles fósiles si se puede utilizar la energía pasiva para lograr los mismos objetivos?

Las inmobiliarias cobran lo que el mercado les permite cobrar, y realmente no hace mucha diferencia cambiar el sistema constructivo por uno Passivhaus e incluir en los presupuestos los componentes necesarios para lograr entrar en el estándar. Si de todas formas se conseguirá una utilidad de por lo menos un 20%, ¿no es mejor otorgar un producto de calidad en vez de recibir una utilidad un poco mayor?

El Plan de Descontaminación Atmosférica en el sur de Chile está dando el mejor de los ejemplos, no hay mejor manera de descontaminar una ciudad que eliminando las chimeneas y estufas de combustión (en ciudades donde hay muchas de ellas), y no hay mejor manera de reemplazar la combustión que con el uso de energía pasiva. Si mencionamos Alemania, nos alejamos años luz, allá las viviendas sociales las hacen bajo el estándar Passivhaus. Pero mejor utilizar lo que está a nuestro alcance, el cliente debe saber que existe este estándar constructivo y es nuestro deber dárselo a conocer.

Es nuestra responsabilidad como constructores ofrecer a la ciudadanía viviendas que piensan a futuro, la tecnología está ahí hace décadas y ahora recién está llegando a Chile, llegó el momento de adaptarse.

Referencias

- Corporación de Desarrollo Tecnológico. (2012). *Humedad por condensación en Viviendas*. Santiago, Chile: Cámara Chilena de la Construcción. Obtenido de <http://cchc.cl>
- CYPE ingenieros S.A. (2018). *Generador de precios Chile*. Santiago, Chile: cype.es. Obtenido de <http://chile.generadordeprecios.info>
- Feist, W. (2003). *Empfehlungen zur Lüftungsstrategie, in Protokollband 23 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser*. Darmstadt, Alemania: Passivhaus Institut.
- Feist, W., & Kaufmann, B. (2002). *Das Passivhaus, Energie-Effizientes-Bauen*. Darmstadt, Alemania: Passivhaus Institut. Obtenido de <https://passivhouse.com>
- Fuentes Molina, G., & Trapp Medina, F. (2009). *Implementación de un sistema de climatización para el casino, mediante Bomba de Calor*. Tesis de Pregrado. Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile. Recuperado el 17 de Noviembre de 2018, de <http://cybertesis.uach.cl>
- Instituto de la Construcción. (2006). *Manual de aplicación de la Reglamentación Térmica*. Santiago, Chile: Ministerio de Vivienda y Urbanismo. Obtenido de <http://minvu.cl>
- Instituto Nacional de Normalización. (1987). *Norma Chilena Oficial NCh849.Of87*. Santiago, Chile: INN.
- International Passive House Association. (2010-2018). *International Passive House Association: IPHA*. Darmstadt, Alemania: Passivhaus Institut. Obtenido de <https://passivehouse-international.org>
- International Passive House Association. (2016). *IPHA Fact sheet, ¿What is a Thermal Bridge?*. Darmstadt, Alemania: Passivhaus Institut. Recuperado el 6 de Noviembre de 2018, de <https://passipedia.org>
- Krämer, K. (15 de Octubre de 2018). China commits to climate protection. *Passivhaus Institut Press Release*. Recuperado el 2018 de Noviembre de 28, de https://passivehouse-international.org/upload/20181015_Pressemitteilung_Call_for_Papers_China_EN.pdf
- Krämer, K. (5 de Septiembre de 2018). High-rise Bolueta ranks first. *Passivehaus Institut Press Release*. Recuperado el 28 de Noviembre de 2018, de https://passivehouse-international.org/upload/20180905_Pressemitteilung_Hochhaus_Bolueta_EN.pdf
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (1992). *D.S. N°47, Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones*. Santiago, Chile: MINVU.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2007). *Mapas Zonificación Térmica*. Santiago, Chile: Gobierno de Chile. Obtenido de www.minvu.cl/incjs/download.aspx?glb_cod_nodo=20070402125030&hdd_no_m_archivo=mapas%20actualizados.7z

- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2012). *Calificación Energética de Viviendas*. Santiago, Chile: Ministerio de Vivienda y Urbanismo. Recuperado el 19 de Noviembre de 2018, de <http://calificacionenergetica.cl>
- Nansen, F. (1898). *Farthest North*. New York, EU: Harper & Brothers Publishers.
- Passive House Institute. (1996-2018). *Passive House Institute: PHI*. Darmstadt, Alemania: Passivhaus Institut. Obtenido de <https://passivehouse.com>
- Passive House Institute. (1996-2018). Passive House Institute. *List of windows*. Darmstadt, Alemania: Passivhaus Institut. Obtenido de <https://database.passivehouse.com/en/components/list/window>
- Passive House Institute. (2014-2018). *Passipedia, The Passive House Resource*. Darmstadt, Alemania: Passivhaus Institut. Obtenido de <https://passipedia.org>
- Passive House Institute. (2015). *Criteria and Algorithms for Certified Passive House Components*. Darmstadt, Alemania: Passivhaus Institut. Obtenido de <https://passivehouse.com>
- Passive House Institute. (2016). *Criteria for the Passive House, EnerPHit and PHI Low Energy Building Standard*. Darmstadt, Alemania: Passivhaus Institut. Obtenido de <https://passivehouse.com>
- Pulso. (26 de Noviembre de 2018). Urbes levantará primer edificio en Chile con estándar Passivhaus que reduce gasto energético. *La tercera*. Recuperado el 28 de Noviembre de 2018, de <https://www.latercera.com/pulso/noticia/urbes-levantara-primer-edificio-chile-estandar-passivhaus-reduce-gasto-energetico/417656/>

Anexos

Anexo 1, Artículo 4.1.10. OGUC

Todas las viviendas deberán cumplir con las exigencias de acondicionamiento térmico que se señalan a continuación:

1. COMPLEJOS DE TECHUMBRE, MUROS PERIMETRALES Y PISOS VENTILADOS:

A. Exigencias:

Los complejos de techumbres, muros perimetrales y pisos inferiores ventilados, entendidos como elementos que constituyen la envolvente de la vivienda, deberán tener una transmitancia térmica “U” igual o menor, o una resistencia térmica total “Rt” igual o superior, a la señalada para la zona que le corresponda al proyecto de arquitectura, de acuerdo con los planos de zonificación térmica aprobados por resoluciones del Ministro de Vivienda y Urbanismo y a la siguiente tabla:

TABLA 1

ZONA	TECHUMBRE		MUROS		PISOS VENTILADOS	
	U	Rt	U	Rt	U	Rt
	W/m ² K	m ² K/W	W/m ² K	m ² K/W	W/m ² K	m ² K/W
1	0,84	1,19	4,0	0,25	3,60	0,28
2	0,60	1,67	3,0	0,33	0,87	1,15
3	0,47	2,13	1,9	0,53	0,70	1,43
4	0,38	2,63	1,7	0,59	0,60	1,67
5	0,33	3,03	1,6	0,63	0,50	2,00
6	0,28	3,57	1,1	0,91	0,39	2,56
7	0,25	4,00	0,6	1,67	0,32	3,13

1. Techumbres:

Para efectos del presente artículo se considerará complejo de techumbre al conjunto de elementos constructivos que lo conforman, tales como cielo, cubierta, aislación térmica, cadenetas, vigas.

Las exigencias de acondicionamiento térmico para la techumbre serán las siguientes:

a) En el caso de mansardas o paramentos inclinados, se considerará complejo de techumbre todo elemento cuyo cielo tenga una inclinación de 60° sexagesimales o menos medidos desde la horizontal.

b) Para minimizar la ocurrencia de puentes térmicos, los materiales aislantes térmicos o soluciones constructivas especificadas en el proyecto de arquitectura, sólo podrán estar interrumpidos por elementos estructurales de la techumbre, tales como cerchas, vigas y/o por tuberías, ductos o cañerías de las instalaciones domiciliarias.

c) Los materiales aislantes térmicos o las soluciones constructivas especificadas en el proyecto de arquitectura, deberán cubrir el máximo de la superficie de la parte superior de los muros en su encuentro con el complejo de techumbre, tales como cadenas, vigas, soleras, conformando un elemento continuo por todo el contorno de los muros perimetrales.

d) Para obtener una continuidad en el aislamiento térmico de la techumbre, todo muro o tabique que sea parte de ésta, tal como lucarna, antepecho, dintel, u otro elemento que interrumpa el acondicionamiento térmico de la techumbre y delimite un local habitable o no habitable, deberá cumplir con la misma exigencia que le corresponda al complejo de techumbre, de acuerdo a lo señalado en la Tabla 1 del presente artículo.

e) Para toda ventana que forme parte del complejo techumbre de una vivienda emplazada entre la zona 3 a 7, ambas inclusive, cuyo plano tenga una inclinación de 60° sexagesimales o menos, medidos desde la horizontal, se deberá especificar una solución de doble vidriado hermético, cuya transmitancia térmica debe ser igual o menor a 3,6 W/m²K.

2. Muros:

Para la aplicación del presente artículo se considerará complejo de muro al conjunto de elementos constructivos que lo conforman y cuyo plano de terminación interior tenga una inclinación de más de 60° sexagesimales, medidos desde la horizontal.

Las exigencias de acondicionamiento térmico para muros serán las siguientes:

a) Las exigencias señaladas en la Tabla 1 del presente artículo, serán aplicables sólo a aquellos muros y/o tabiques, soportantes y no soportantes, que limiten los espacios interiores de la vivienda con el espacio exterior o con uno o más locales abiertos y no será aplicable a aquellos muros medianeros que separen unidades independientes de vivienda.

b) Los recintos cerrados contiguos a una vivienda, tales como bodegas, leñeras, estacionamientos, invernadero, serán considerados como recintos abiertos para efectos de esta reglamentación, y sólo les será aplicable las exigencias de la Tabla 1 a los paramentos que se encuentren contiguos a la envolvente de la vivienda.

c) Para minimizar la ocurrencia de puentes térmicos en tabiques perimetrales, los materiales aislantes térmicos o soluciones constructivas especificadas en el proyecto de arquitectura, sólo podrán estar interrumpidos por elementos estructurales, tales como pies derechos, diagonales estructurales y/o por tuberías, ductos o cañerías de las instalaciones domiciliarias.

d) En el caso de la albañilería confinada de conformidad a la definición de la NCh 2123, no será exigible el valor de U de la Tabla 1 en los elementos estructurales, tales como pilares, cadenas y vigas.

e) En el caso de que el complejo muro incorpore materiales aislantes, la solución constructiva deberá considerar barreras de humedad y/o de vapor, según el tipo de material incorporado en la solución constructiva y/o estructura considerada.

f) En el caso de puertas vidriadas exteriores, deberá considerarse como superficie de ventana la parte correspondiente al vidrio de la misma. Las puertas al exterior de otros materiales no tienen exigencias de acondicionamiento térmico.

3. Pisos Ventilados:

Para efectos de la aplicación del presente artículo se considerará complejo de piso ventilado al conjunto de elementos constructivos que lo conforman que no están en contacto directo con el terreno. Los planos inclinados inferiores de escaleras o rampas que estén en contacto con el exterior, también se considerarán como pisos ventilados.

Para minimizar la ocurrencia de puentes térmicos en pisos ventilados, los materiales aislantes térmicos o soluciones constructivas especificadas en el proyecto de arquitectura, sólo podrán estar interrumpidos por elementos estructurales del piso o de las instalaciones domiciliarias, tales como vigas, tuberías, ductos o cañerías.

B. Alternativas para cumplir las exigencias térmicas definidas en el presente artículo:

Para los efectos de cumplir con las condiciones establecidas en el Tabla 1 se podrá optar entre las siguientes alternativas:

1. Mediante la incorporación de un material aislante etiquetado con el R100 correspondiente a la Tabla 2:

Se deberá especificar y colocar un material aislante térmico, incorporado o adosado, al complejo de techumbre, al complejo de muro, o al complejo de piso ventilado cuyo R100 mínimo, rotulado según la norma técnica NCh 2251, de conformidad a lo indicado en la tabla 2 siguiente:

TABLA 2

ZONA	TECHUMBRE R100(*)	MUROS R100(*)	PISOS VENTILADOS R100(*)
1	94	23	23
2	141	23	98
3	188	40	126
4	235	46	150
5	282	50	183
6	329	78	239
7	376	154	295

(*) Según la norma NCh 2251: R100 = valor equivalente a la Resistencia Térmica (m^2K / W) x 100.

2. Mediante un Certificado de Ensaye otorgado por un laboratorio con inscripción vigente en el Registro Oficial de Laboratorios de Control Técnico de Calidad de la Construcción del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, reglamentado por el D.S.Nº 10, (V. y U.), de 2002, demostrando el cumplimiento de la transmitancia o resistencia térmica total de la solución del complejo de techumbre, muro y piso ventilado.

3. Mediante cálculo, el que deberá ser realizado de acuerdo a lo señalado en la norma NCh 853, demostrando el cumplimiento de la transmitancia o resistencia térmica del complejo de techumbre, muro y piso ventilado. Dicho cálculo deberá ser efectuado por un profesional competente.

4. Especificar una solución constructiva para el complejo de techumbre, muro y piso ventilado que corresponda a alguna de las soluciones inscritas en el Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Acondicionamiento Térmico, confeccionado por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo.

2. EXIGENCIAS PARA VENTANAS:

Se considerará complejo de ventana, a los elementos constructivos que constituyen los vanos vidriados de la envolvente de la vivienda.

A. Porcentaje máximo superficie de ventanas respecto a paramentos verticales de la envolvente:

El complejo de ventana deberá cumplir con las exigencias establecidas en la Tabla 3, en relación al tipo de vidrio que se especifique y a la zona térmica en la cual se emplace el proyecto de arquitectura. El tipo de vidrio a utilizar en las superficies de ventanas deberá ser indicado en las especificaciones técnicas del proyecto de arquitectura.

Para determinar el porcentaje máximo de superficie de ventanas de un proyecto de arquitectura, se deberá realizar el siguiente procedimiento:

a) Determinar la superficie de los paramentos verticales de la envolvente del proyecto de arquitectura. La superficie total a considerar para este cálculo, corresponderá a la suma de las superficies interiores de todos los muros perimetrales que considere la unidad habitacional, incluyendo los medianeros y muros divisorios.

b) Determinar la superficie total de ventanas del proyecto de arquitectura, correspondiente a la suma de la superficie de los vanos del muro en el cual está colocada la ventana, considerando, para ello, el marco como parte de su superficie. Para el caso de ventanas salientes, se considerará como superficie de ventana aquella correspondiente al desarrollo completo de la parte vidriada.

La superficie máxima de ventanas que podrá contemplar el proyecto de arquitectura, corresponderá a la superficie que resulte de aplicar la Tabla 3, respecto de la superficie de los paramentos verticales de la unidad habitacional señalada en el punto a) precedente, considerando la zona y el tipo de vidrio que se especifique.

TABLA 3

ZONA	VENTANAS		
	% MÁXIMO DE SUPERFICIE VIDRIADA RESPECTO A PARAMENTOS VERTICALES DE LA ENVOLVENTE		
	VIDRIO MONOLÍTICO (b)	DVH DOBLE VIDRIADO HERMÉTICO (c)	
		$3.6 \text{ W/m}^2\text{K} \geq U > 2.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ (a)	$U \leq 2.4 \text{ W/m}^2\text{K}$
1	50%	60%	80%
2	40%	60%	80%
3	25%	60%	80%
4	21%	60%	75%
5	18%	51%	70%
6	14%	37%	55%
7	12%	28%	37%

(a) La doble ventana que forme una cámara de aire, se asimila al DVH, con valor U entre 3,6 y 2,4 W/m²K

(b) Vidrio monolítico: De acuerdo a la NCh 132, se entenderá por aquel producto inorgánico de fusión, que ha sido enfriado hasta un estado rígido sin cristalización, formado por una sola lámina de vidrio.

(c) Doble vidriado hermético (DVH):

De acuerdo a la NCh 2024, se entenderá por doble vidriado hermético el conjunto formado por dos o más vidrios paralelos, unidos entre sí, por un espaciador perimetral, que encierran en su interior una cámara con aire deshidratado o gas inerte.

En el caso que el proyecto de arquitectura considere más de un tipo de vidrio, según Tabla 3, se deberá determinar el máximo porcentaje posible para cada tipo de vidrio respecto a la superficie total de la envolvente vertical. Para ello, por cada tipo de vidrio a utilizar, se deberá aplicar la siguiente fórmula:

$$\frac{TP \times MV}{100} = MSV$$

TP: Porcentaje del tipo de vidrio respecto del total de la superficie vidriada.

MV: Porcentaje máximo de superficie vidriada respecto a paramentos verticales de la envolvente, según Tabla 3.

MSV: Porcentaje máximo de superficie, para tipo de vidrio, respecto de la superficie total de la envolvente.

B. Método Alternativo del U ponderado:

Sólo en las zonas térmicas: 3, 4, 5, 6 y 7, se podrá utilizar un método alternativo del U ponderado el cual sólo podrá aplicarse para el caso de vidrios monolíticos.

Para los casos previstos en el párrafo anterior, se podrá aumentar la superficie vidriada sobre los valores de Tabla 3 de este artículo, compensando el aumento de superficie vidriada con el mejoramiento de la transmitancia térmica de la solución de muros. El U ponderado deberá tener un valor igual o menor al señalado para la zona en la que se ubique el proyecto de arquitectura, de acuerdo a la Tabla 4 siguiente:

TABLA 4

ZONA	U Ponderado W/m²K
3	2.88
4	2.56
5	2.36
6	1.76
7	1.22

Para determinar la transmitancia térmica ponderada de los paramentos verticales de la envolvente del proyecto de arquitectura se deberá calcular el U ponderado del proyecto de conformidad a la fórmula que se señala, debiendo los muros perimetrales en contacto

al exterior poseer una transmitancia térmica igual o menor al valor establecido, según zona térmica, en las exigencias para muros de la Tabla 1 del presente artículo:

$$\frac{(SM \times UM) + (SV \times UV)}{STE} = U \text{ Ponderado}$$

SM: Superficie de muro

UM: Transmitancia térmica del muro

SV: Superficie de ventana

UV: Transmitancia térmica ventana

STE: Superficie total de los paramentos verticales de la envolvente del proyecto de arquitectura

Para la aplicación de la fórmula del párrafo anterior, los muros que limiten con uno o más locales cerrados, deberán considerarse como parte de la envolvente para efectos de cálculo del U ponderado. Para estos muros se adoptará la transmitancia establecida para la zona térmica en la cual se emplace el proyecto de arquitectura, de acuerdo a la Tabla 1, independiente de su transmitancia térmica real.

En el caso en que los paramentos verticales del proyecto de arquitectura estén compuestos por más de una solución constructiva, determinando así, más de una transmitancia térmica para muros, se aplicará la siguiente fórmula para determinar el U ponderado:

$$\frac{(SM - 1 \times U 1) + (SM - 2 \times U - 2) + (SM - n \dots \times U - n \dots) + (SV \times UV)}{STE} = U \text{ Ponderado}$$

SM- 1: Superficie muro 1

U-1: Transmitancia térmica muro 1

SM-2: Superficie muro 2

U-2: Transmitancia térmica muro 2

SV: Superficie ventana

UV: Transmitancia térmica ventana.

STE: Superficie total de los paramentos verticales de la envolvente

En ambos casos si el proyecto de arquitectura contempla más de un tipo de ventana, asimilados a distintos valores de Transmitancia, según la Tabla 3, se ponderará, toda la superficie vidriada con el valor de transmitancia térmica del vidrio monolítico.

La superficie de ventana para el vidrio monolítico del cálculo del U ponderado no podrá, en ningún caso, aumentar más de un 40 % respecto al porcentaje máximo de superficie permitido para la zona térmica, según lo señalado en la Tabla 3.

Anexo 2, Mapas de Zonificación climática del MINVU

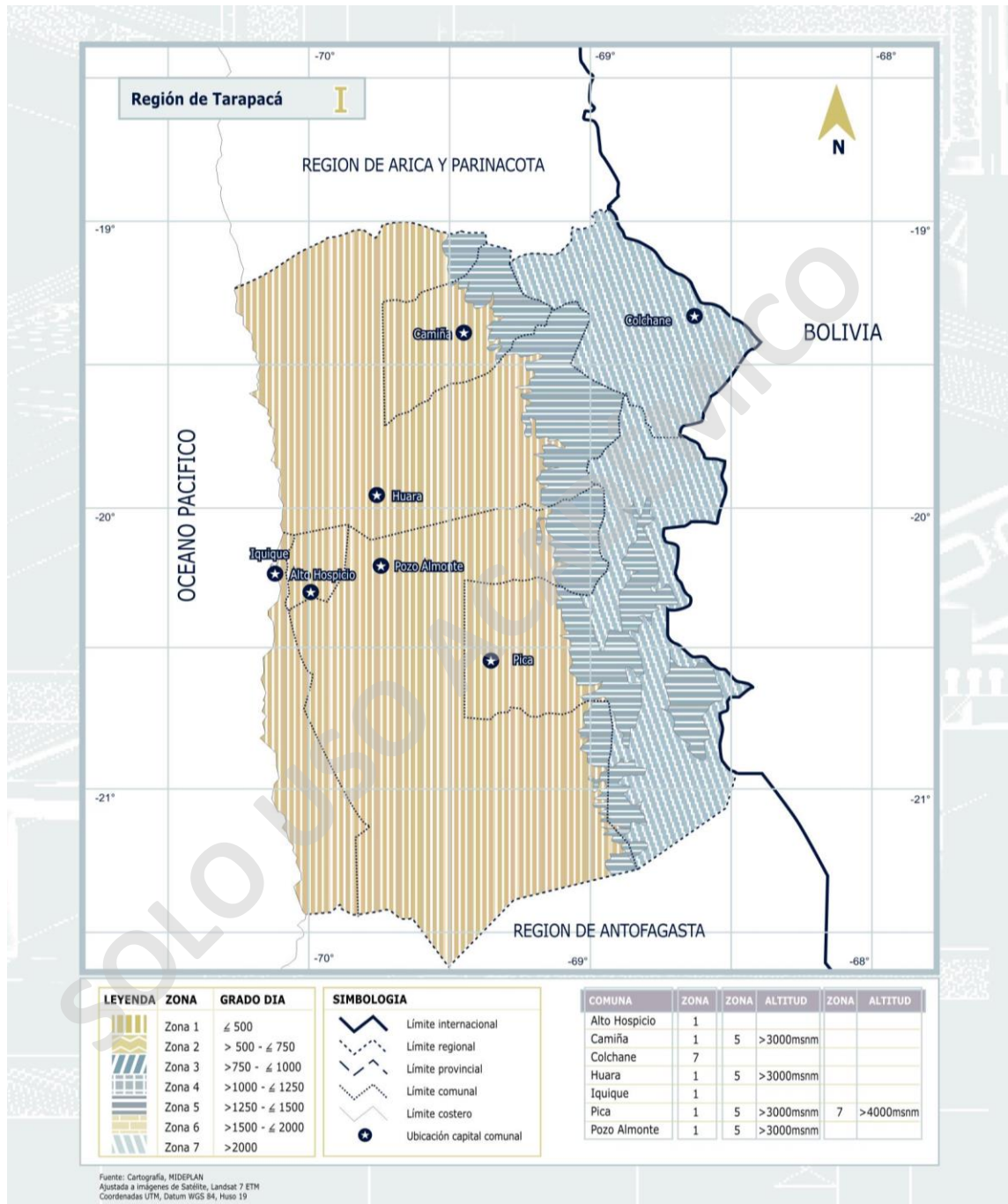


Figura 46, Mapa de zonas climáticas de la Primera Región. MINVU, 2007

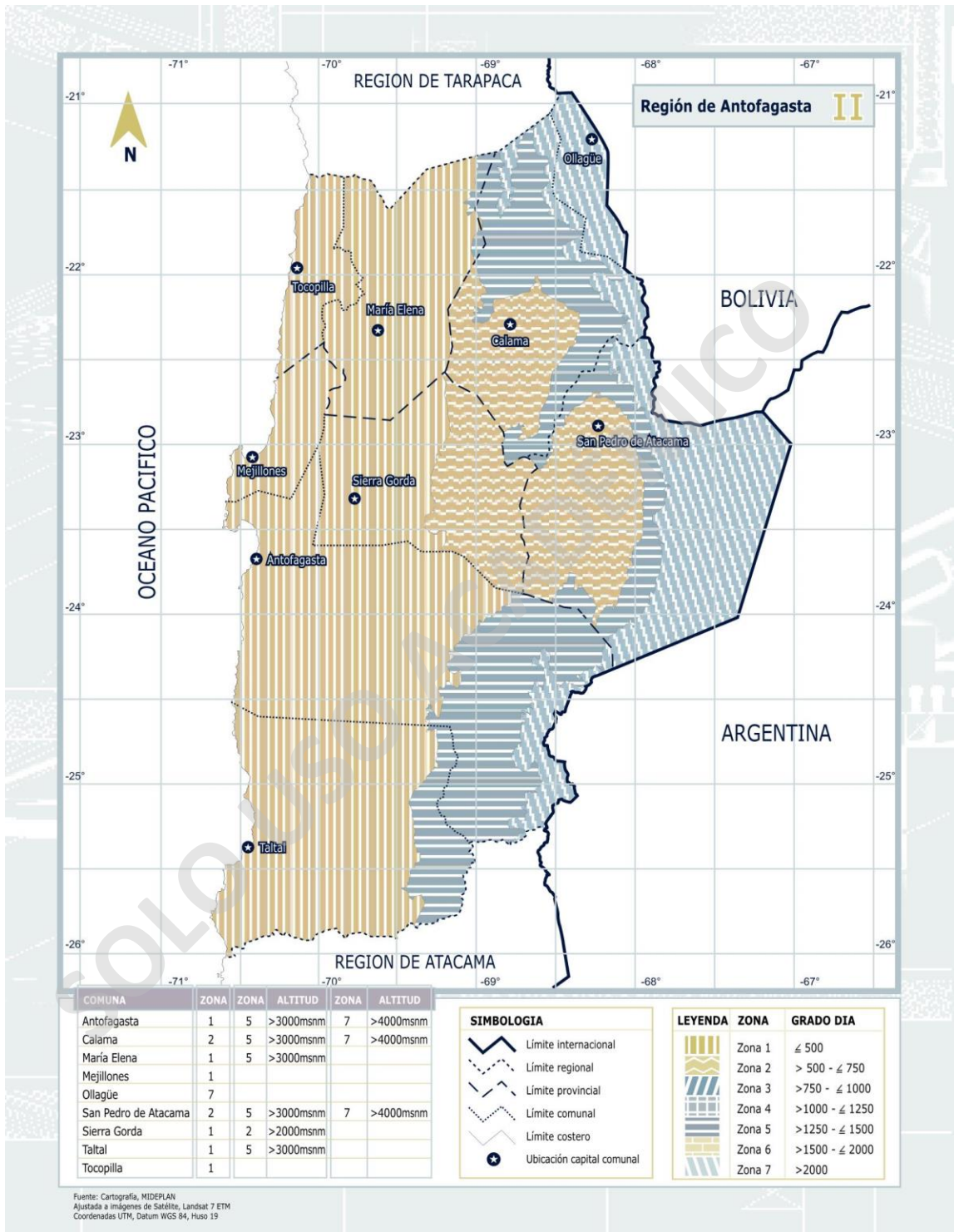


Figura 47, Mapa de zonas climáticas de la Segunda Región. MINVU, 2007

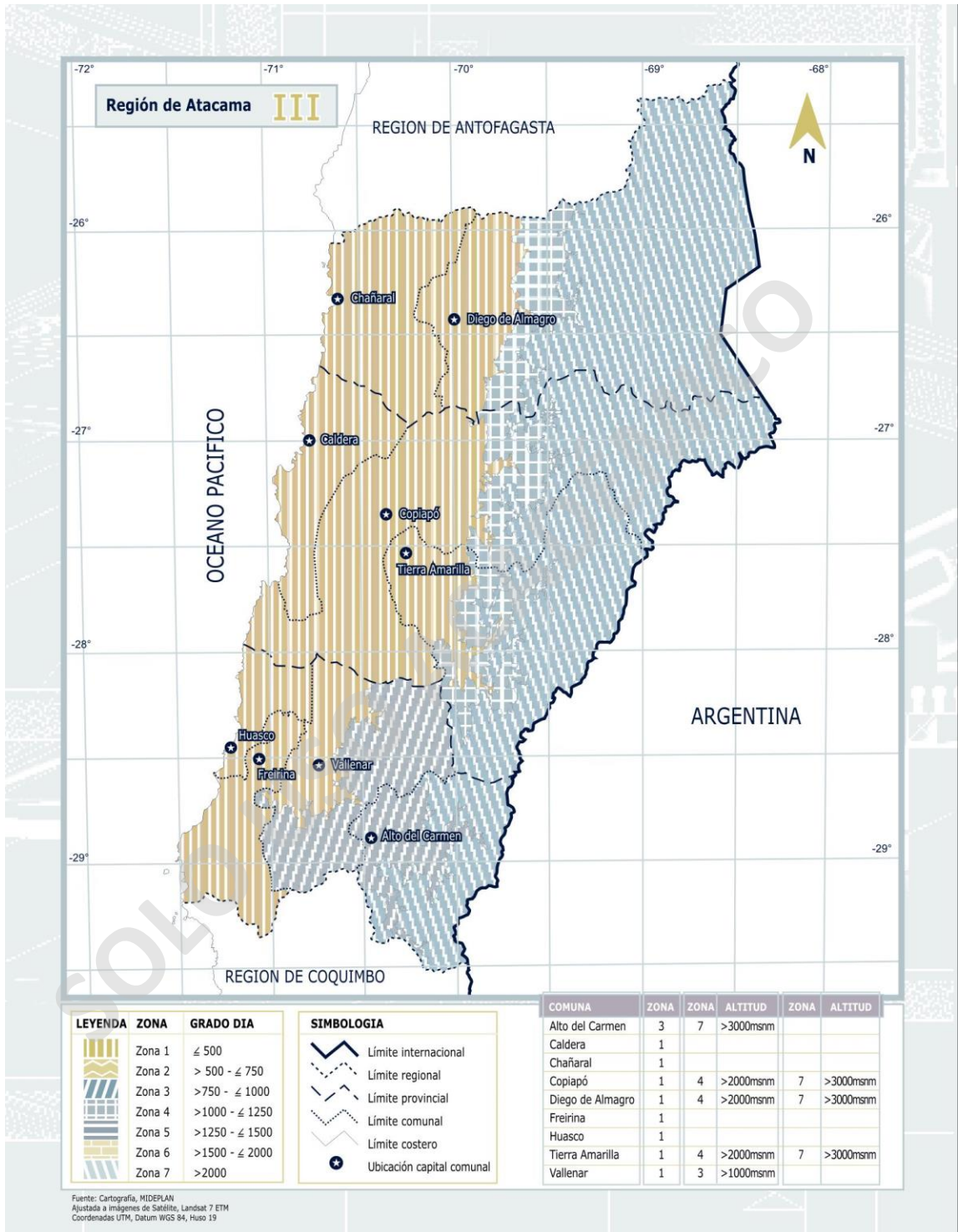


Figura 48, Mapa de zonas climáticas de la Tercera Región. MINVU, 2007

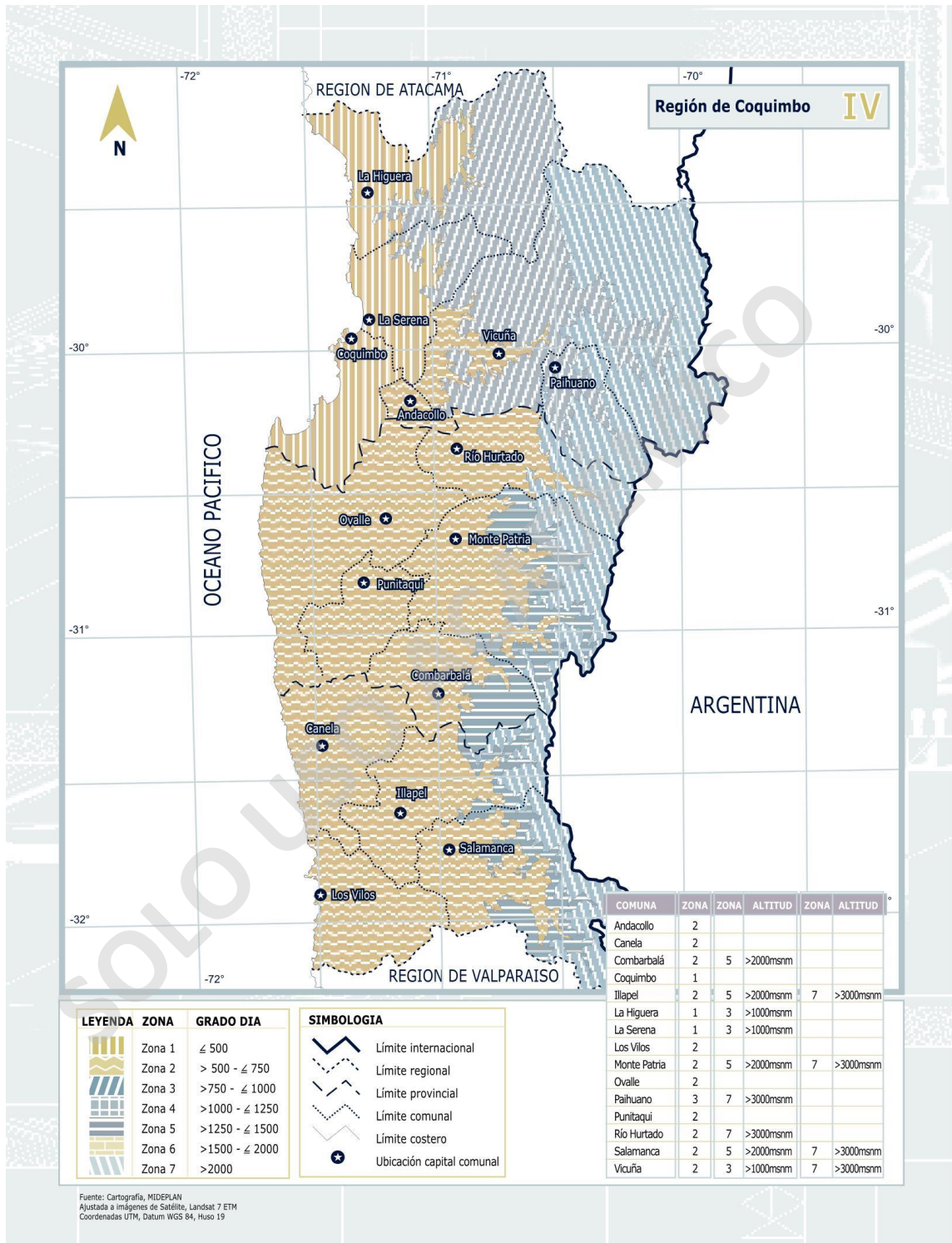


Figura 49, Mapa de zonas climáticas de la Cuarta Región. MINVU, 2007

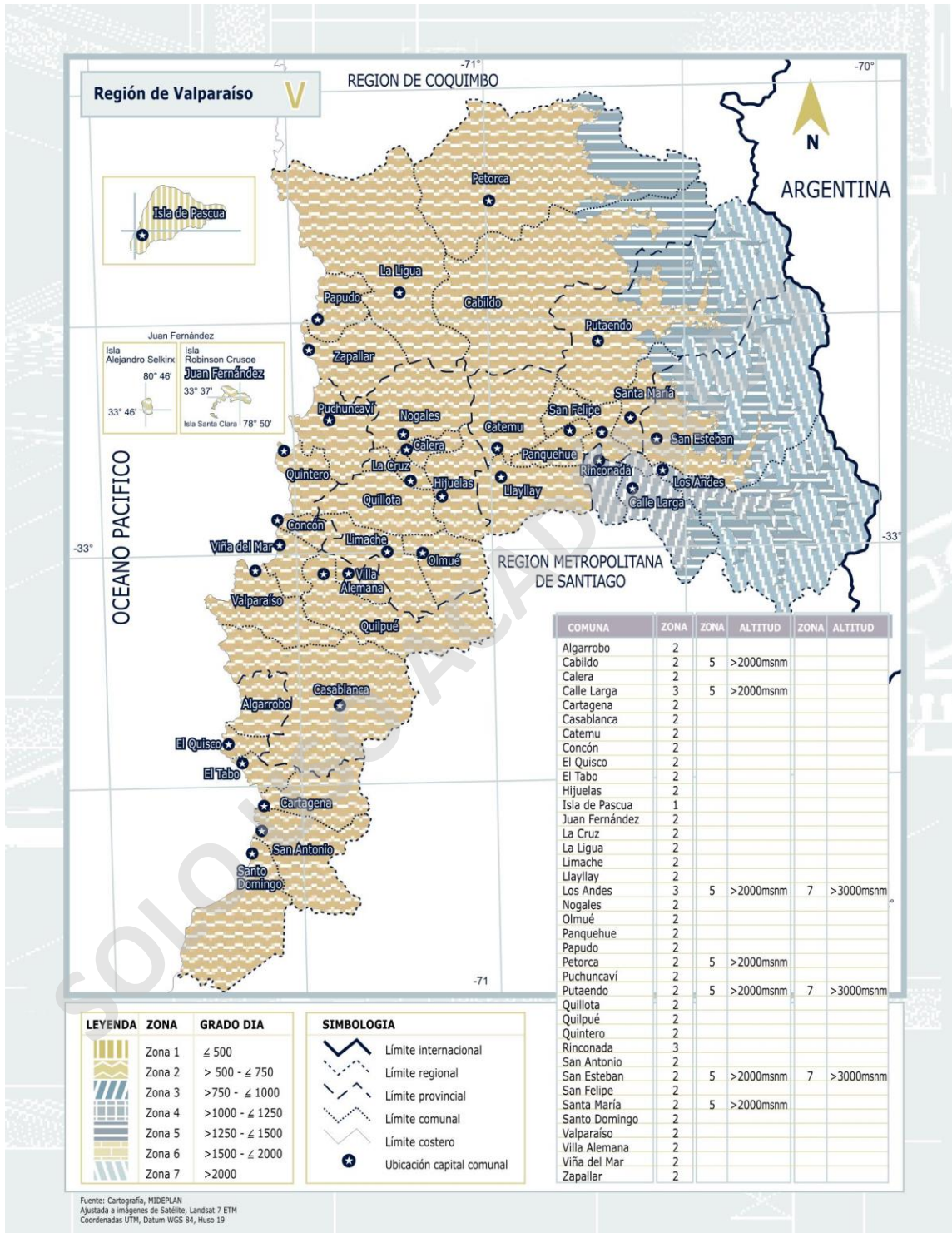


Figura 50, Mapa de zonas climáticas de la Quinta Región. MINVU, 2007

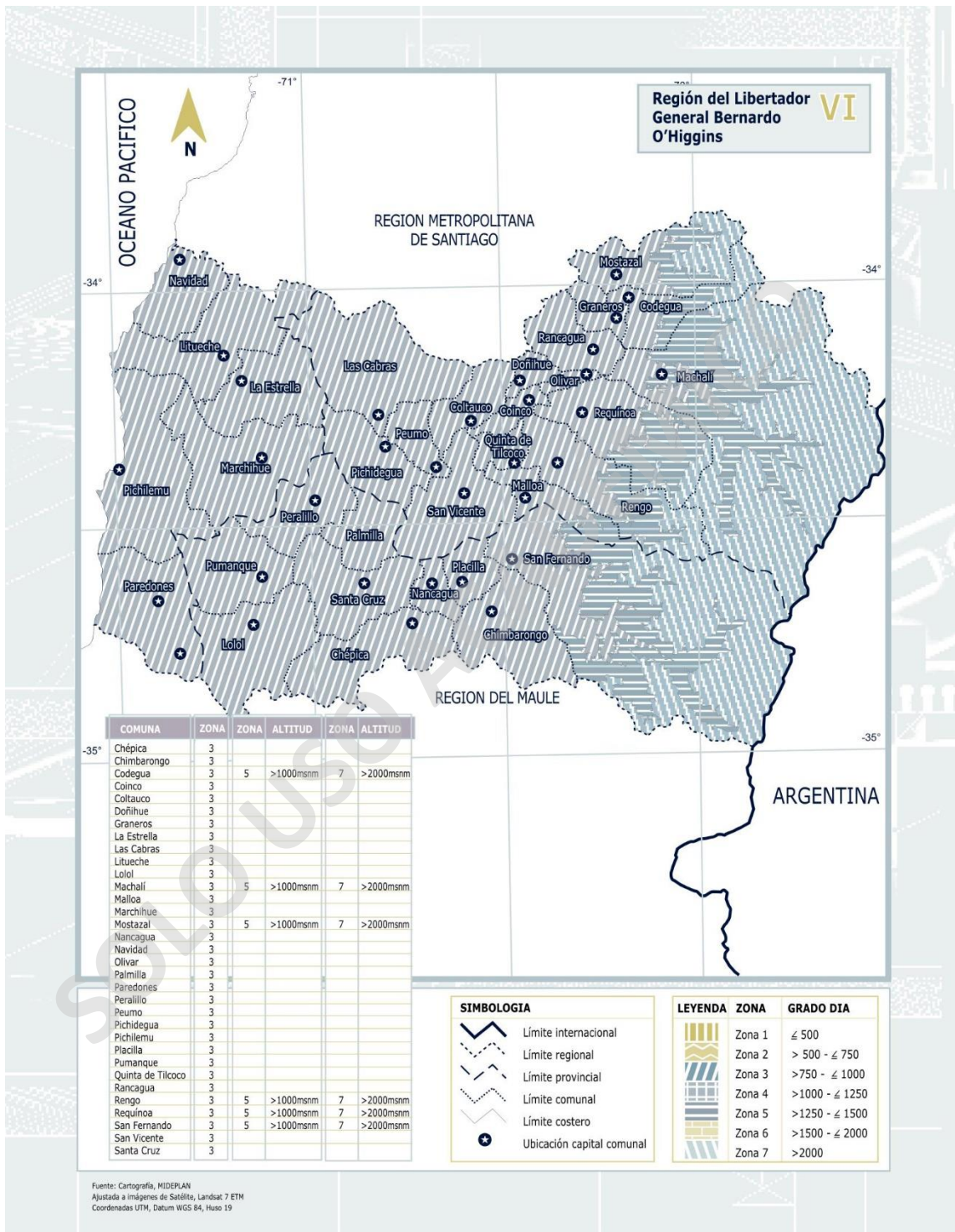


Figura 51, Mapa de zonas climáticas de la Sexta Región. MINVU, 2007

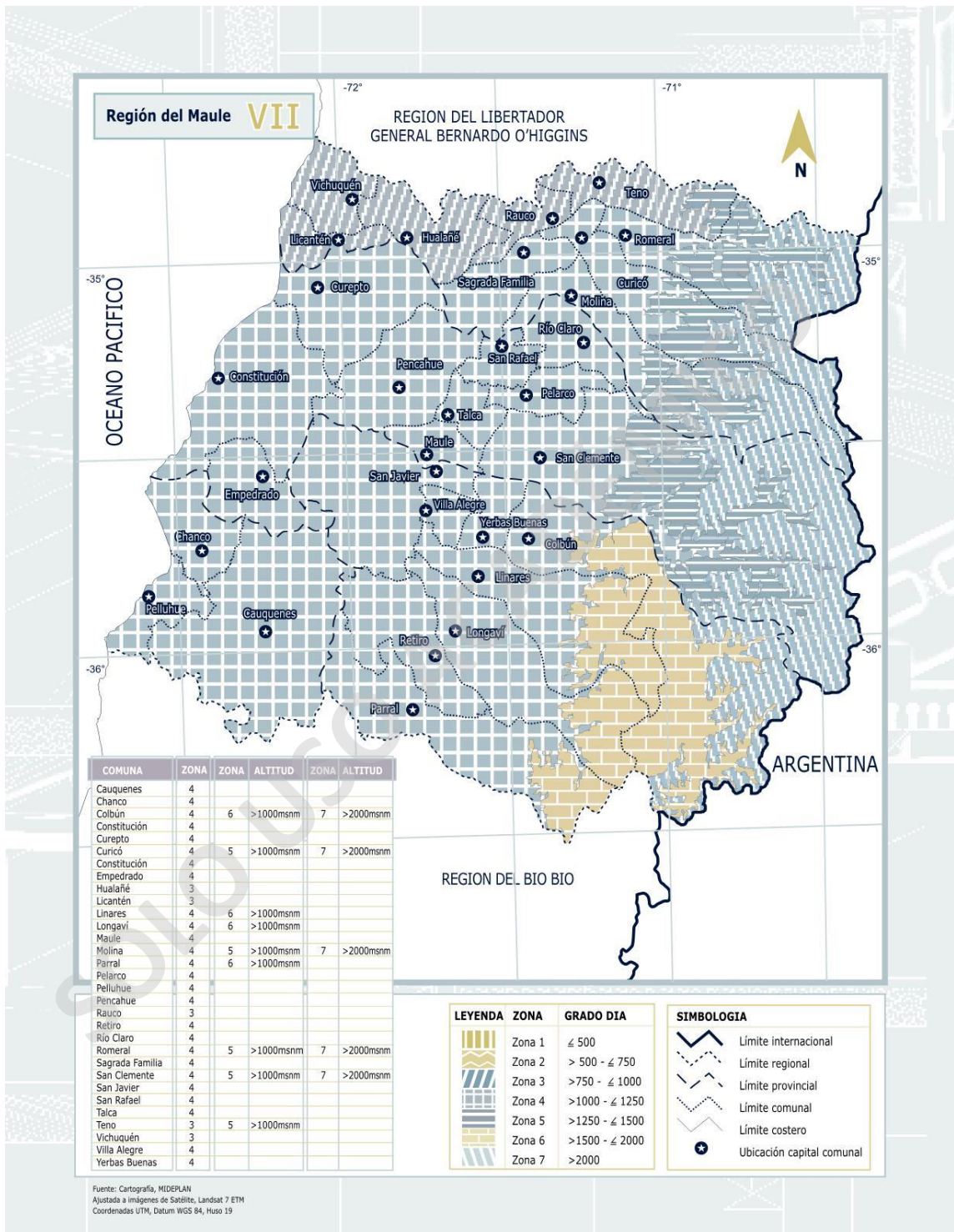


Figura 52, Mapa de zonas climáticas de la Séptima Región. MINVU, 2007

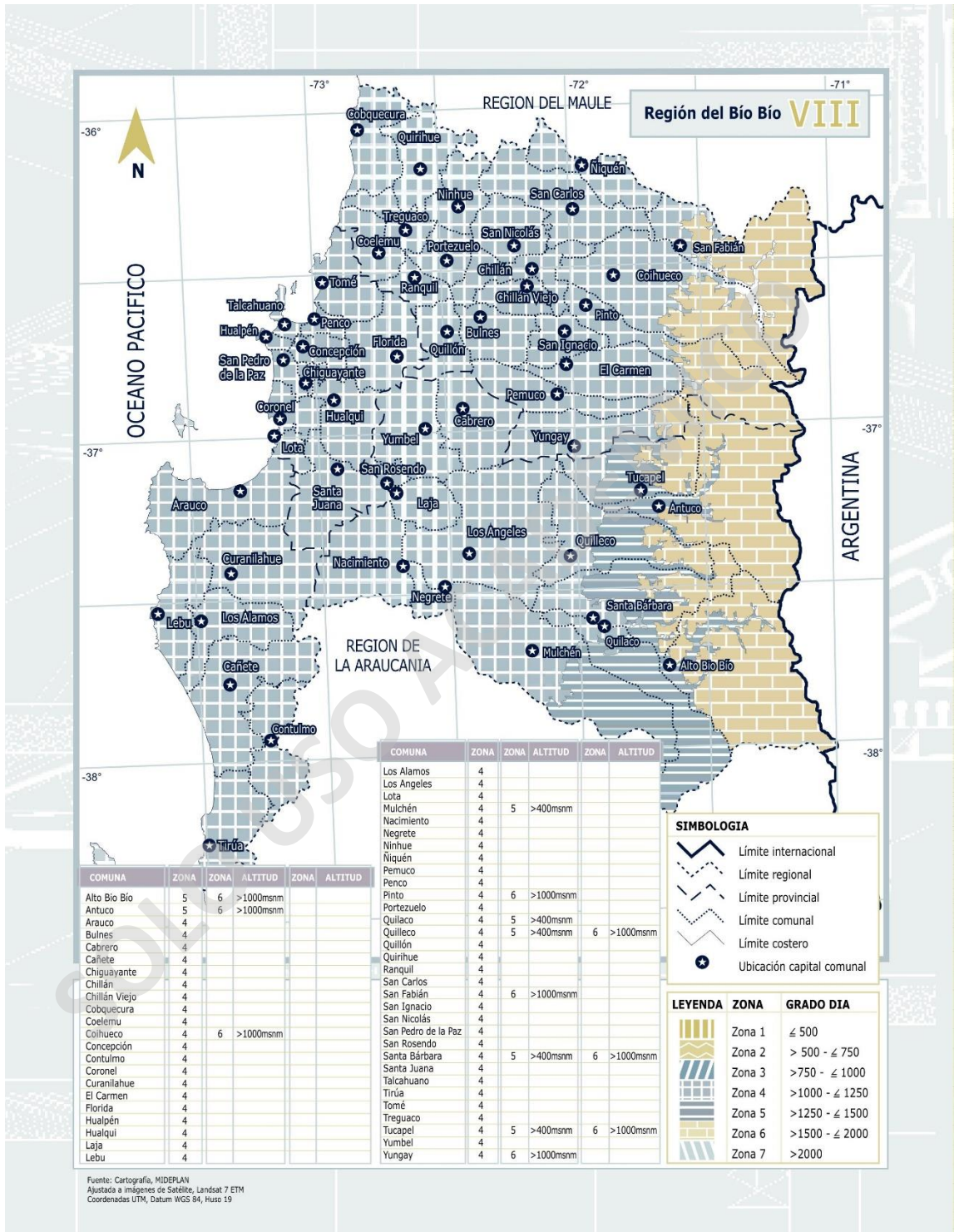


Figura 53, Mapa de zonas climáticas de la Octava Región. MINVU, 2007

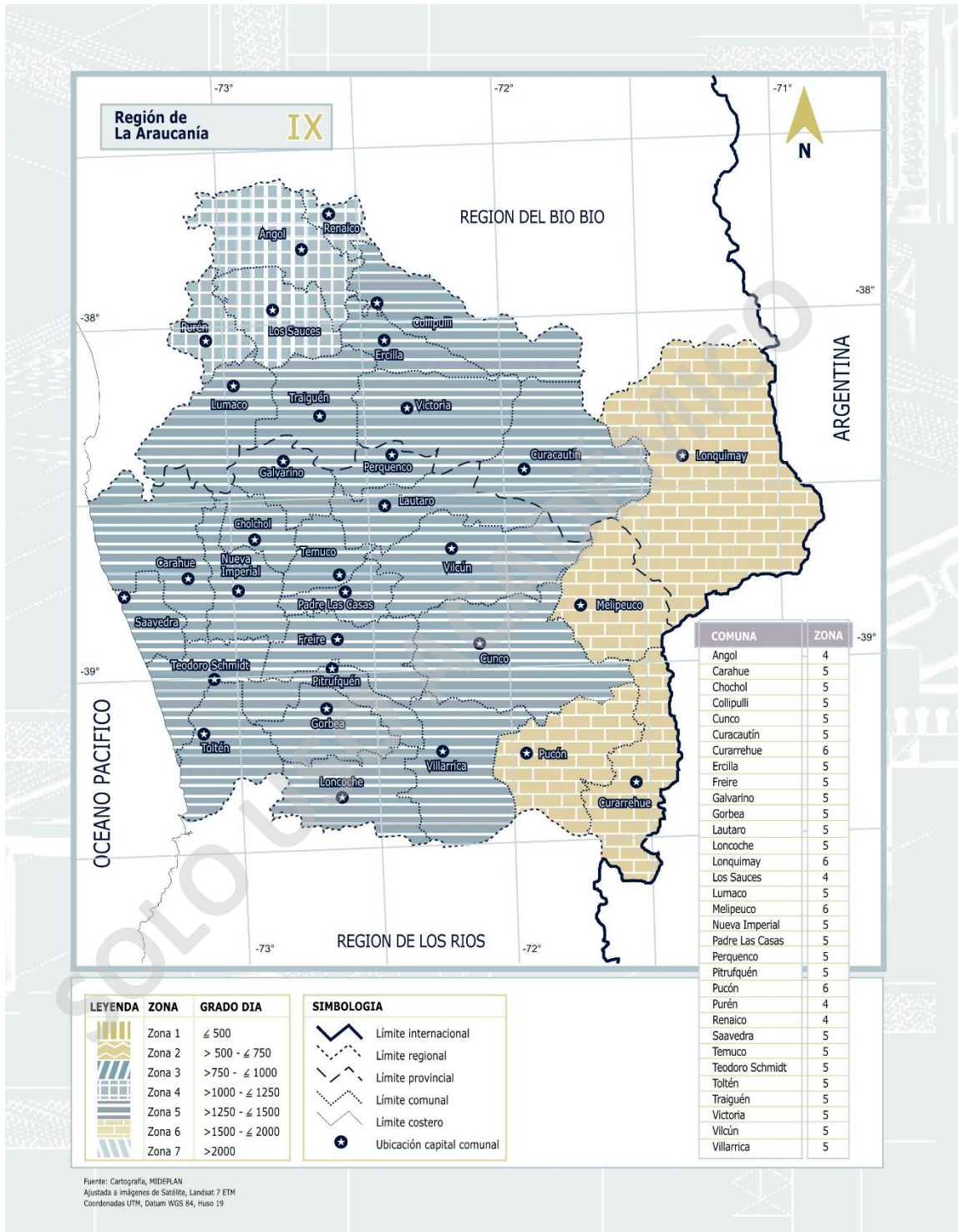


Figura 54, Mapa de zonas climáticas de la Novena Región. MINVU, 2007

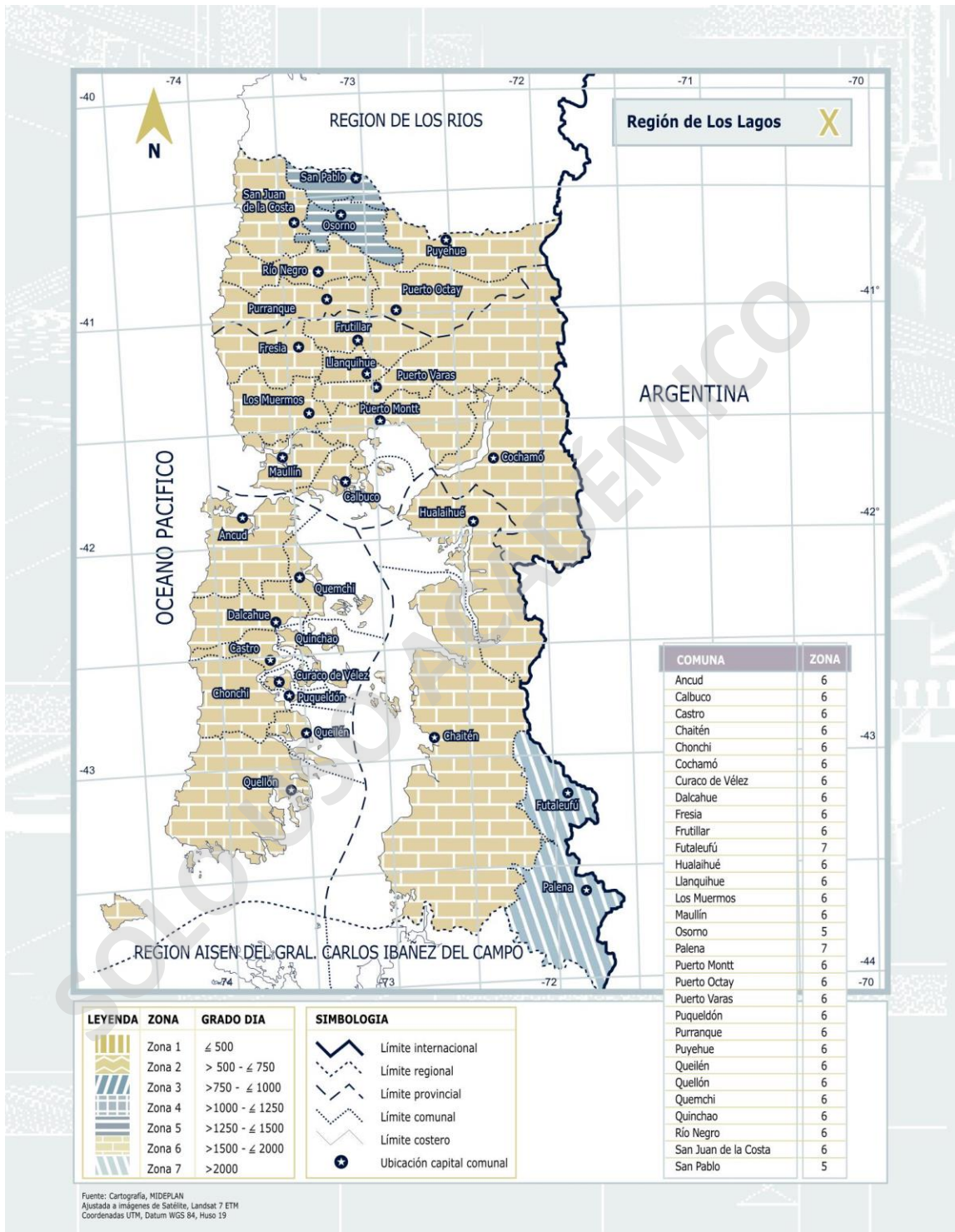


Figura 55, Mapa de zonas climáticas de la Décima Región. MINVU, 2007

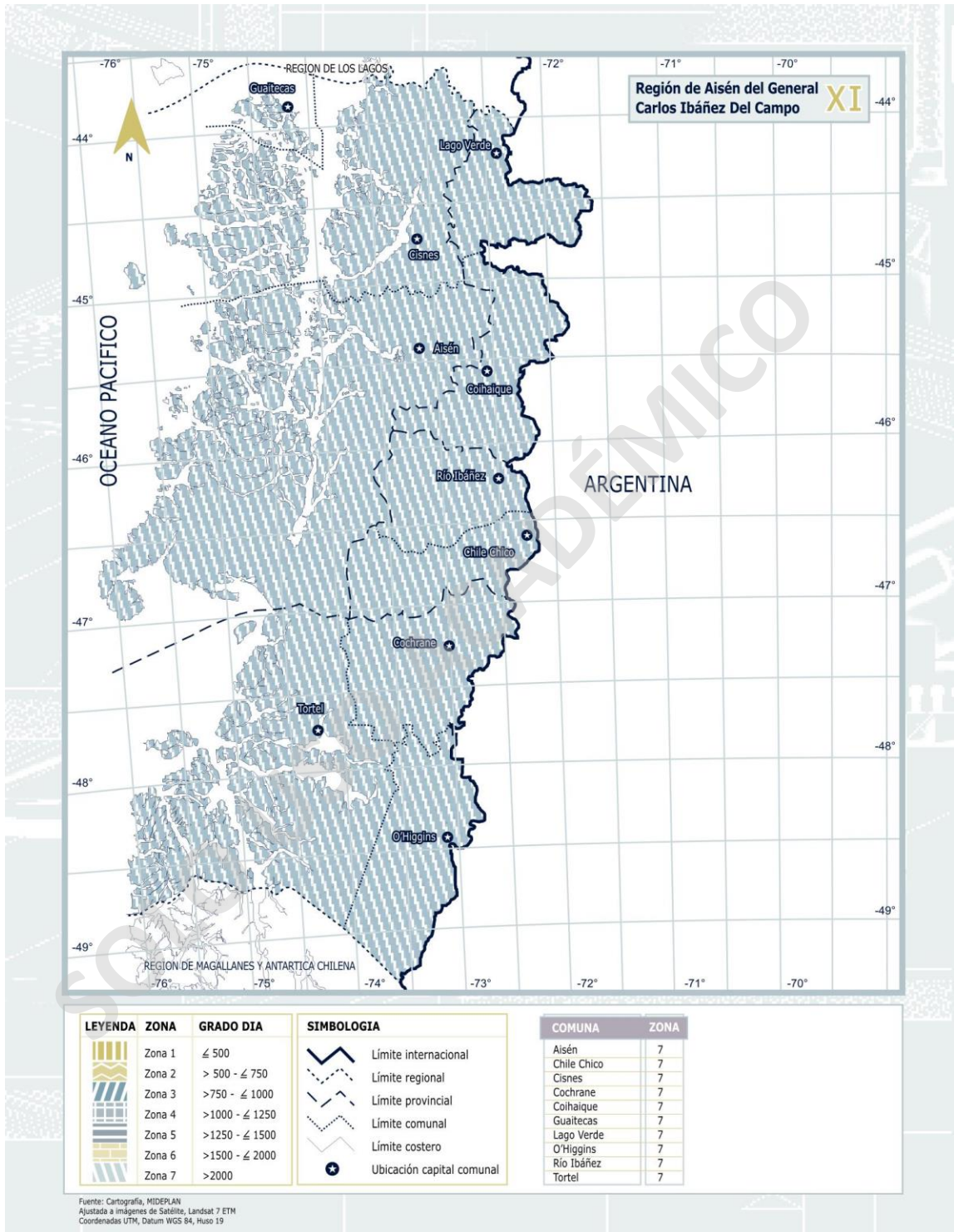


Figura 56, Mapa de zonas climáticas de la Undécima Región. MINVU, 2007

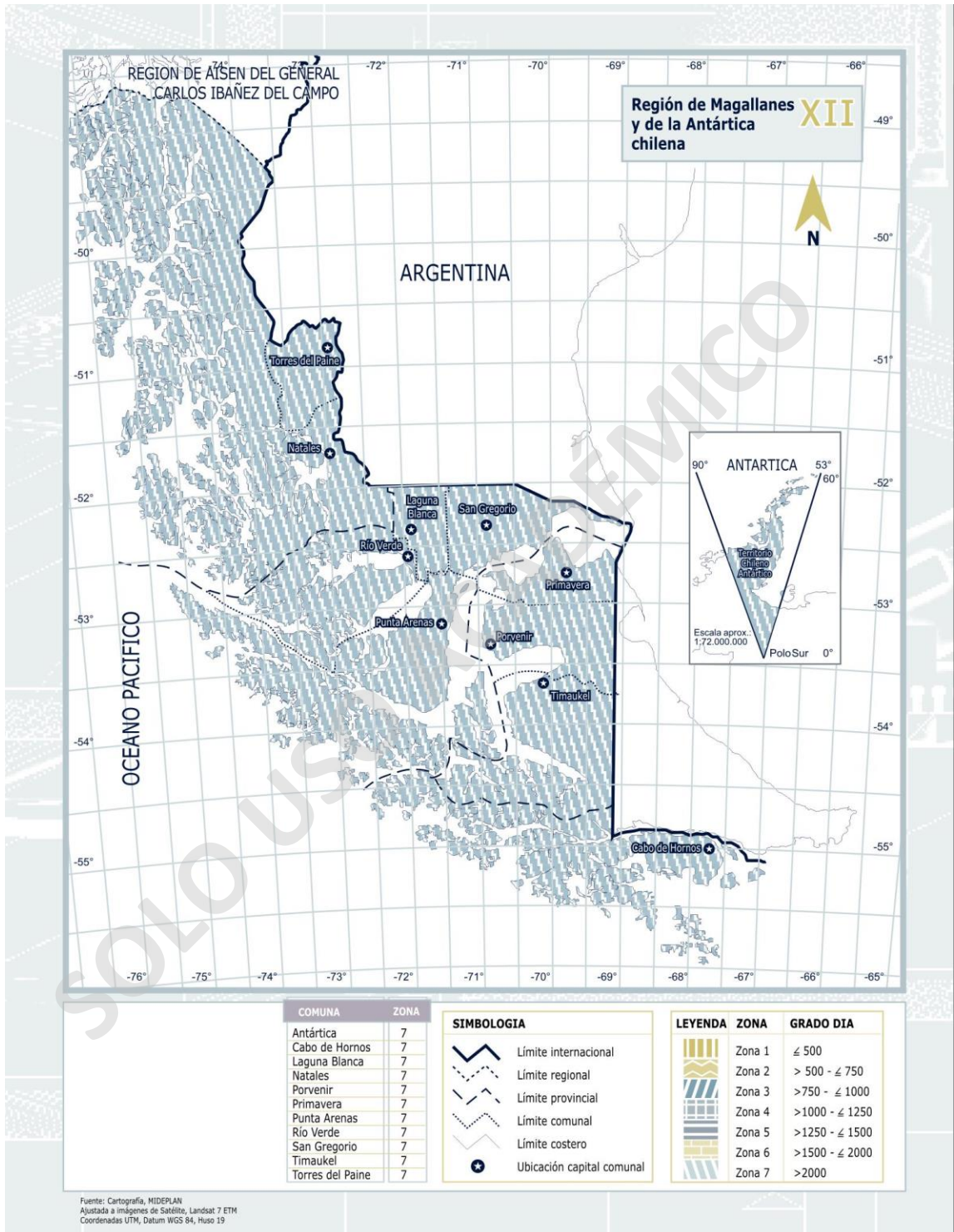


Figura 57, Mapa de zonas climáticas de la Duodécima Región. MINVU, 2007

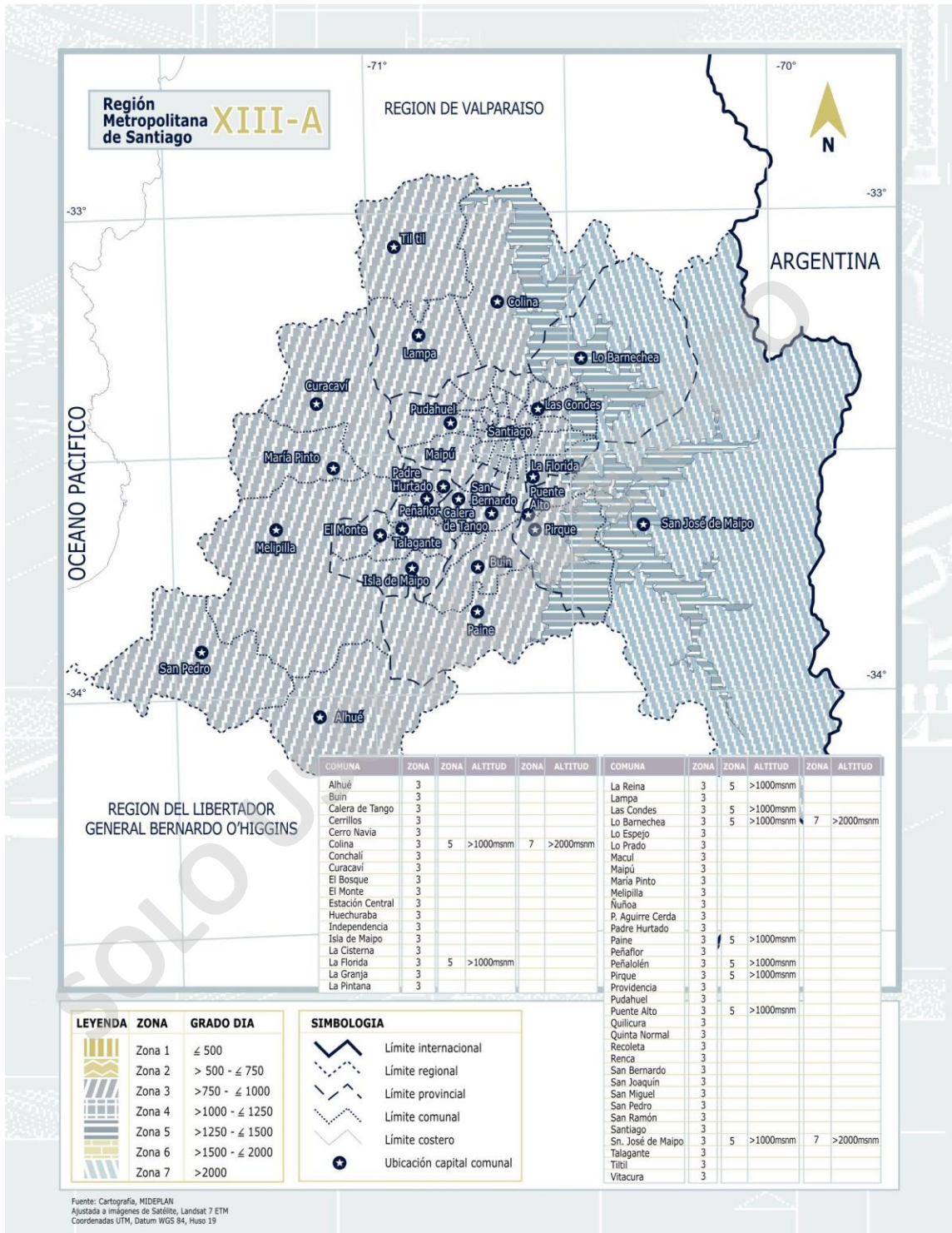


Figura 58, Mapa de zonas climáticas de la Decimotercera-a Región. MINVU, 2007

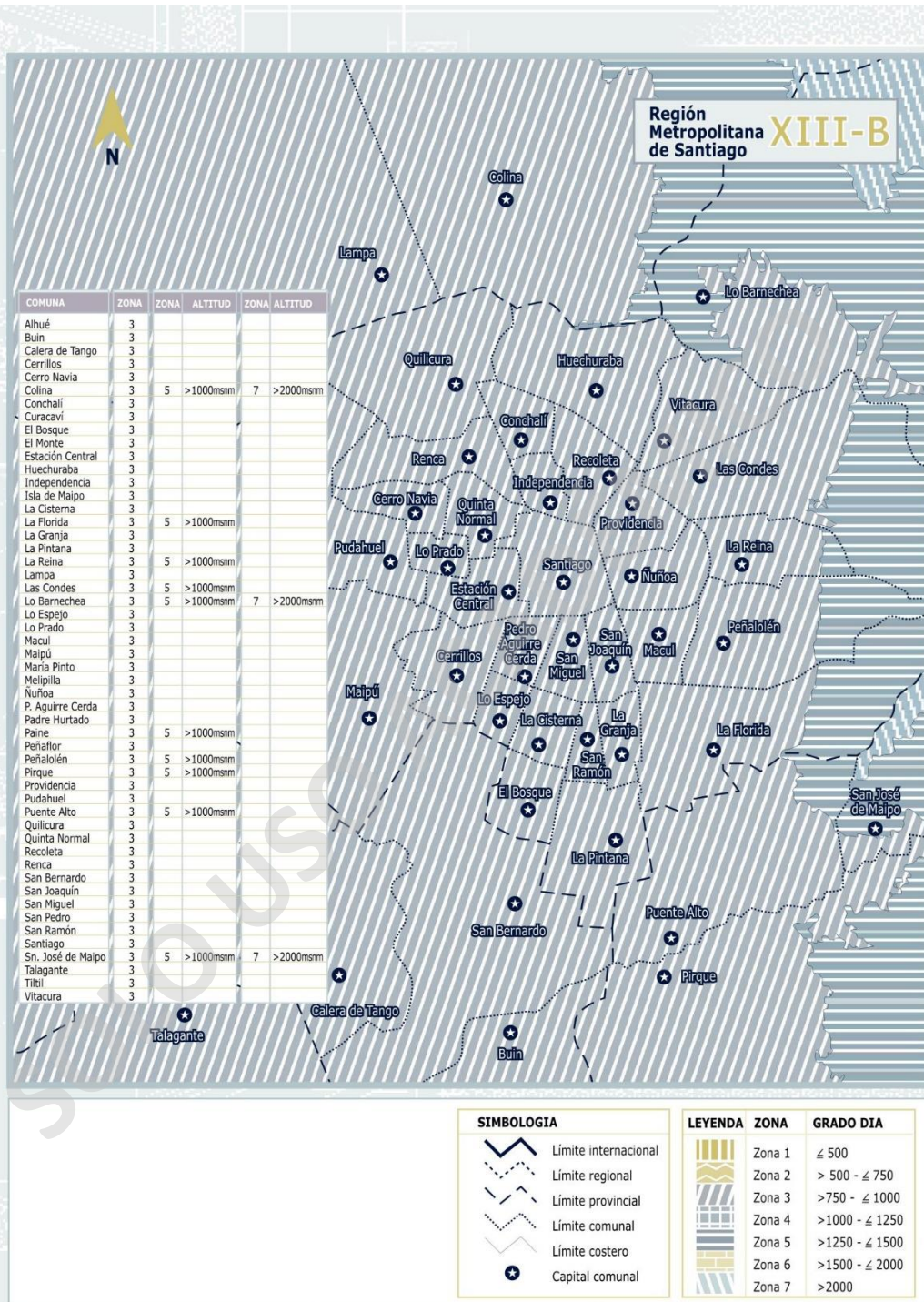


Figura 59, Mapa de zonas climáticas de la Decimotercera-b Región. MINVU, 2007

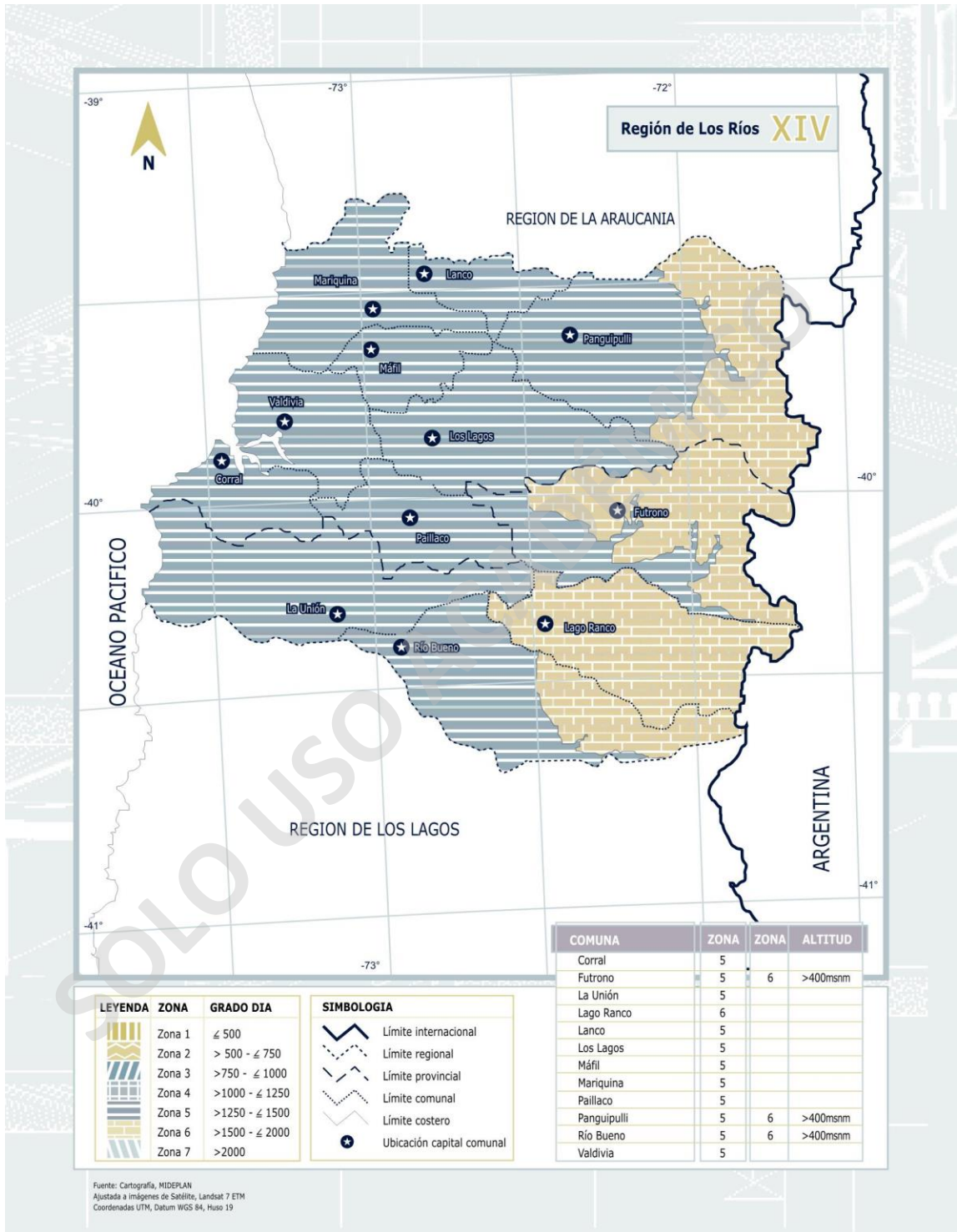


Figura 60, Mapa de zonas climáticas de la Decimocuarta Región. MINVU, 2007

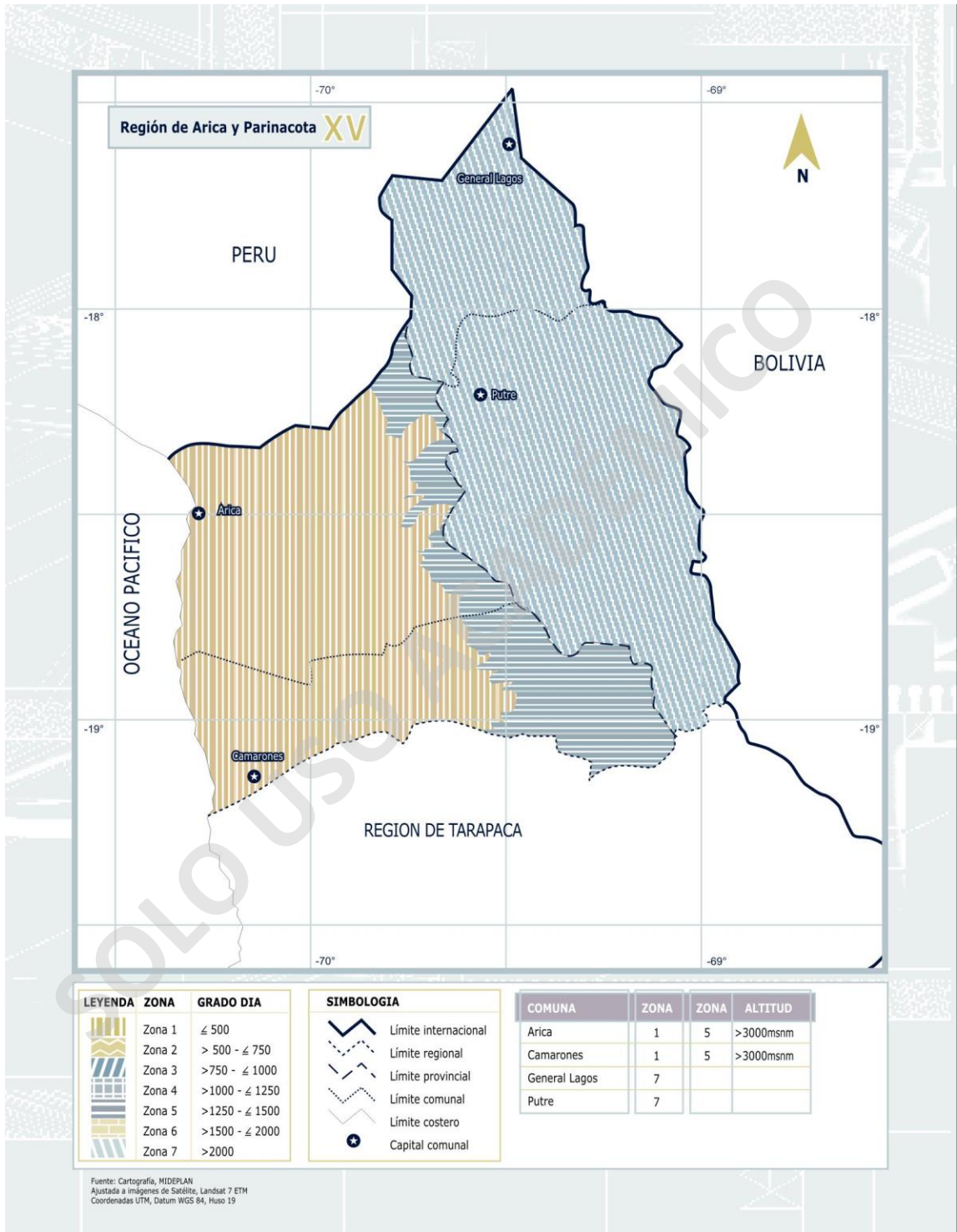


Figura 61, Mapa de zonas climáticas de la Decimoquinta Región. MINVU, 2007

Anexo 3, Artículo 4.1.2. OGUC

Los locales habitables deberán tener, al menos, una ventana que permita la entrada de aire y luz del exterior, con una distancia mínima libre horizontal de 1,5 m medida en forma perpendicular a la ventana cuando se trate de dormitorios. Sin embargo, se admitirán ventanas fijas selladas siempre que se contemplen ductos de ventilación adecuados o sistemas de aire acondicionado conectados a grupo electrógeno automático y que no se trate de dormitorios o recintos en los que se consulten artefactos de combustión de cualquier tipo. Asimismo, las salas de reunión o de venta y los locales de cualquier tipo pertenecientes a un centro comercial cerrado, podrán no consultar ventana siempre que dispongan de un sistema de climatización artificial.

Los locales no habitables sin ventanas o con ventanas fijas deberán ventilarse a través de un local habitable, o bien contemplar algún sistema de renovación de aire.

Anexo 4, Artículo 4.1.3. OGUC

No obstante, lo dispuesto en el artículo anterior, los baños, cocinas y lavaderos, cuando no contemplen ventana al exterior que permita la renovación de aire, deberán ventilarse mediante un ducto, individual o colectivo, de sección libre no interrumpida de, al menos, 0,16 m².

Estos ductos serán exclusivos para ventilación, no podrán servir a baños y cocinas simultáneamente y deberán indicarse en los planos de planta de arquitectura y de estructura del proyecto.

La sección mínima indicada en el inciso primero podrá reducirse en caso de contemplarse tiraje forzado, debiendo justificarse técnicamente la sección proyectada.

La salida del ducto al exterior, salvo especificación distinta contemplada en el respectivo proyecto, deberá sobresalir al menos 1 m de la cubierta y situarse a una distancia libre no menor a 3 m de cualquier elemento que entorpezca la ventilación por dos o más de sus costados.

Anexo 5, Artículo 4.1.4. OGUC

La ventilación de locales habitables de carácter industrial o comercial, como tiendas, oficinas, talleres, bodegas y garajes, podrá efectuarse directamente hacia patios y vías particulares o públicas, o bien, por escotillas o linternas de techumbres por las cuales deberá el aire circular libremente sin perjudicar recintos colindantes. El área mínima de estas aberturas no será inferior a la duodécima parte del área del piso del local.

La ventilación de tales recintos puede efectuarse también por medios mecánicos que funcionen sin interrupción y satisfactoriamente durante las horas de trabajo.

Los locales comerciales que tengan accesos por galerías comerciales techadas y que no cuenten con ventilación directa al exterior, deberán ventilarse mediante conductos (shafts) de sección no inferior a 0.20 m². Cuando estos locales se destinen a preparación y venta de alimentos, reparaciones (eléctricas, ópticas, calzados), talleres fotográficos, lavasecos u otros usos que produzcan olores o emanaciones, dicha ventilación deberá activarse por medios mecánicos durante las horas de trabajo.

SOLO USO ACADÉMICO