



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

DIRECCIÓN DE POSTGRADO

Facultad de Ingeniería - Programa de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con mención en
Ingeniería Mecánica

**Potencial de un muro Trombe como método de calefacción pasiva y
reductor de emisiones de MP 2,5 para viviendas sociales en localidades
de Chile**



Tesis para optar al grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería con mención en Ingeniería Mecánica

Cristóbal Agurto Sáez

CONCEPCIÓN - CHILE

2022

Profesor Guía: Cristian Cuevas Barraza
Dpto. de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería
Universidad de Concepción

Agradecimientos

Agradezco profundamente a mi familia que me dieron ánimo para llevar a cabo todo este proceso, el cual no fue fácil.



Resumen

En esta investigación se analiza una calefacción pasiva para una vivienda social a base de un muro Trombe con el fin de reducir las emisiones de $MP_{2.5}$, las cuales contribuyen a 4500 muertes al año en las localidades de Temuco, Osorno y Coyhaique (Boso et al, 2019). El muro Trombe simula el espacio más concurrido de una vivienda social, representando el living – comedor con un volumen de 45 m^3 . Este se evalúa mediante simulación utilizando el software TRNSYS. Las ciudades consideradas en este estudio son Temuco, Osorno y Coyhaique, dado que son las ciudades más contaminadas del país y del continente. Se estudian diferentes configuraciones de muros Trombe, analizando qué tipo de circulación de aire es más eficiente y qué elementos de masa térmica pueden contribuir a reducir la demanda de calefacción en la habitación de estudio. Para la circulación de aire se compara el efecto de circulación forzada y natural, mientras que para el análisis de elementos de masa térmica se contrastan distintos materiales con diferentes niveles de capacitancia específica. La mejor combinación corresponde al sistema con circulación de aire natural entre el muro Trombe y la habitación colindante, con un muro Trombe compuesto por tubos de PVC llenos de agua. Como principales resultados, se alcanza una reducción en la demanda de calefacción y emisión de $MP_{2.5}$ del orden de 18.3%, 14% y 21.8% para Temuco, Osorno y Coyhaique, respectivamente. Además, se alcanza un aumento de temperatura promedio de la habitación a la que se encuentra conectado el muro Trombe de 3°C , 2.8°C y 3.9°C en Temuco, Osorno y Coyhaique, respectivamente.

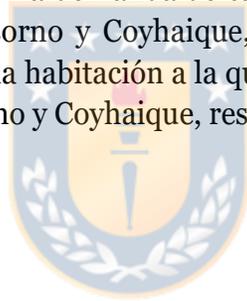


Tabla de Contenido

Agradecimientos	i
Resumen	ii
Índice de figuras	i
Índice de tablas	iii
Nomenclatura	iv
CAPÍTULO 1	1
Introducción	1
1.1 Descripción del Problema	1
FIGURA 1. Porcentaje de consumo de energía para calor y frío, en el sector residencial (CDT, In-Data SpA, 2019).	1
1.2 Hipótesis y Objetivos	4
1.2.1 Hipótesis	4
1.2.2 Objetivos.....	4
1.3 Metodología	5
CAPÍTULO 2	7
Condiciones de Borde	7
2.1 Caracterización de localidades.....	7
2.2 Descripción de la habitación de estudio	10
2.3 Incorporación del muro Trombe al módulo de estudio	13
2.4 Simulación en TRNSYS	16
CAPÍTULO 3	17
Modelo	17
3.1. Modelo de la habitación	17
3.2 Modelación del muro Trombe.....	17
3.3.1 Estimación de las emisiones de MP _{2,5} para el caso de estudio	20
3.3.2 Artefactos de calefacción más utilizados	20
CAPÍTULO 4	23
Simulación	23
CAPÍTULO 5	28

Discusión de Resultados 28

CAPÍTULO 6 33

Conclusiones y perspectivas 33

Referencias 34

ANEXO A..... 37



Índice de figuras

Figura 1: Uso de fuentes de energía para calefacción según región.....	1
Figura 2: Principio de funcionamiento de un Muro Trombe.....	3
Figura 3: Radiación solar promedio mensual sobre una superficie horizontal para las localidades de estudio.....	7
Figura 4: Temperatura exterior promedio mensual para las localidades de estudio.....	8
Figura 5: Emisión promedio mensual MP2.5	9
Figura 6: Esquema módulo de estudio.....	11
Figura 7: Detalle D1.....	11
Figura 8: Vista en planta módulo de estudio.....	12
Figura 9: Muro Trombe instalado en la fachada norte de la habitación de estudio.....	14
Figura 10: Vista en corte del muro Trombe en el módulo de estudio.....	14
Figura 11: Vista en planta del muro Trombe en el módulo de estudio.....	15
Figura 12: Principio del modelo del muro Trombe.....	18
Figura 13: Estrategia de simulación TRNSYS.....	18
Figura 14: Ahorros [%] en demanda de calefacción.....	29
Figura 15: Comparación entre la demanda de calefacción y las pérdidas térmicas del muro Trombe para Osorno.....	30
Figura 16: Demanda de calefacción para diferentes elementos de masa térmica para una circulación forzada de 30 kg/h en Osorno.....	31
Figura 17: Demanda de calefacción para muros Trombe 2 y Trombe 3, Flujo natural 3 en Osorno.....	32
Figura A-1: Demanda de calefacción total, zona interior, localidad de Coyhaique, 0 kg/h.....	37
Figura A-2: Demanda de calefacción total, zona interior, localidad de Coyhaique, 10 kg/h.....	37
Figura A-3: Demanda de calefacción total, zona interior, localidad de Coyhaique, 30 kg/h.....	38

Figura A-4: Demanda de calefacción total, zona interior, localidad de Coyhaique, 60 kg/h.....	38
Figura A-5: Demanda de calefacción total, zona interior, localidad de Osorno, 0 kg/h.....	39
Figura A-6: Demanda de calefacción total, zona interior, localidad de Osorno, 10 kg/h.....	39
Figura A-7: Demanda de calefacción total, zona interior, localidad de Osorno, 30 kg/h.....	40
Figura A-8: Demanda de calefacción total, zona interior, localidad de Osorno, 60 kg/h.....	40
Figura A-9: Demanda de calefacción total, zona interior, localidad de Temuco, 0 kg/h.....	41
Figura A-10: Demanda de calefacción total, zona interior, localidad de Temuco, 10 kg/h.....	41
Figura A-11: Demanda de calefacción total, zona interior, localidad de Temuco, 30 kg/h.....	42
Figura A-12: Demanda de calefacción total, zona interior, localidad de Temuco, 60 kg/h.....	42



Índice de tablas

Tabla 1: Clasificación Köppen y características meteorológicas de las ciudades de estudio.....	8
Tabla 2: Niveles de calidad ambiental según la concentración de MP2.5.....	9
Tabla 3: Escenarios en localidades de estudio en base a la calidad del aire.....	9
Tabla 4: Transmitancia térmica mínima de la envolvente.....	10
Tabla 5: Características de la envolvente de la habitación de estudio para Temuco y Osorno....	12
Tabla 6: Características de la envolvente de la habitación de estudio para Coyhaique.....	13
Tabla 7: Dimensiones del muro Trombe	13
Tabla 8: Características de materiales usados en el muro Trombe	18
Tabla 9: Casos de estudio para condición de flujo natural	16
Tabla 10: Variables de entrada y salida del Type 36.....	19
Tabla 11: Factores de emisión de MP2.5 para combustión de leña en equipos residenciales	20
Tabla 12: Porcentajes de uso de artefactos de calefacción para cada ciudad.....	21
Tabla 13: Rendimiento de los sistemas de distribución.....	22
Tabla 14: Rendimiento del sistema de control.....	21
Tabla 15: Rendimientos considerados para cada localidad.....	22
Tabla 16: Demanda de calefacción para flujo natural 3, casos Trombe 2 y Trombe 3, kWh	23
Tabla 17: Demanda de calefacción, en kWh, para una circulación forzada y un flujo de 30 kg/h.....	24
Tabla 18: Demanda de calefacción, en kWh, para una circulación forzada y un flujo de 60kg/h.....	28
Tabla 19: Comparación de demanda de calefacción (kWh) para el caso base y los mejores casos de circulación natural y forzada.....	26
Tabla 20: Comparación de emisiones de MP2.5 entre el caso base y el caso para la combinación Flujo natural 3 y Trombe 3.....	27
Tabla 21: Temperatura interior, °C.....	28
Tabla 22: Emisiones MP2.5 para el caso base y el mejor caso de estudio.....	31

Nomenclatura

A_g	Área total de la sección transversal del orificio, m ²
A_v	Área total del orificio, m ²
C	Consumo de leña, kg
C_1	Coefficiente de pérdida de presión de ventilación
C_2	Coefficiente de pérdida de presión
E	Emisiones MP _{2.5} , g
g	Aceleración de gravedad, m/s ²
h	Altura de muro, m
\dot{m}	Caudal másico de aire en el orificio, kg/s
PCI	Poder calorífico inferior, kWh/kg
Q	Demanda de energía, kWh
T_m	Temperatura media del aire en el muro Trombe, °C
T_r	Temperatura del aire en la habitación, °C
T_{rmin}	Resistencia térmica mínima, m ² K/W
T_1	Temperatura borde pared muro Trombe, °C
U_{max}	Coefficiente de transferencia de calor máximo, W/m ² K
\bar{v}	Velocidad promedio del aire, m/s

Abreviaturas

$Temp$	Temperatura
Ext	Exterior
Int	Interior

Letras Griegas

η	Eficiencia
$\bar{\rho}$	Densidad promedio de aire, kg/m ³
γ	Estrategia intercambio de aire en muro Trombe

CAPÍTULO 1

Introducción

1.1 Descripción del Problema

Como indica Mardones y Cornejo (2020), las fuentes más relevantes en la liberación de gases contaminantes atmosféricos son el tráfico vehicular, la actividad industrial y el uso de leña para calefacción domiciliar. Esto influye directamente en la calidad del aire, generando contaminación y afectando la salud de las personas. Acorde con (Boso et al, 2019) y (Instituto políticas públicas de salud, 2016) a nivel mundial mueren al año 3400 millones de personas y a nivel nacional 11300 personas, producto a la contaminación. Además, existen otros efectos atribuidos a la contaminación, como el aumento del riesgo de enfermedades respiratorias agudas.

La zona sur de Chile, específicamente desde Temuco hacia el sur, se caracteriza por el uso masivo de leña para calefacción (Mardones y Cornejo, 2020), siendo la principal fuente de MP2.5, el cual por su tamaño es muy nocivo para la salud. Además, dentro de los efectos en el ecosistema se encuentra la lluvia ácida, la destrucción de la capa de ozono, el smog fotoquímico y el efecto invernadero, como consecuencias generales del proceso de combustión (Ministerio de medio ambiente, 2018).

Según la OMS, Coyhaique es la ciudad que presenta mayores índices de MP2.5 (Perez et al, 2020) en el país, con concentraciones de 220% por sobre la norma anual (Ministerio de medio ambiente, 2018). En esta localidad el 99.7% de las emisiones son producidas por los sistemas de combustión a leña, mientras que el transporte genera un 0.2% y la industria un 0.1% (Perez et al, 2020). Adicionalmente, el aporte residencial de leña a las emisiones totales de MP2.5 es de 85%, muy superior al aporte de otras fuentes tales como incendios forestales, quemas agrícolas o fuentes móviles (Ministerio de energía, 2020). La Figura 1 presenta el porcentaje de consumo de energía para calor y frío por fuente, en el sector residencial.

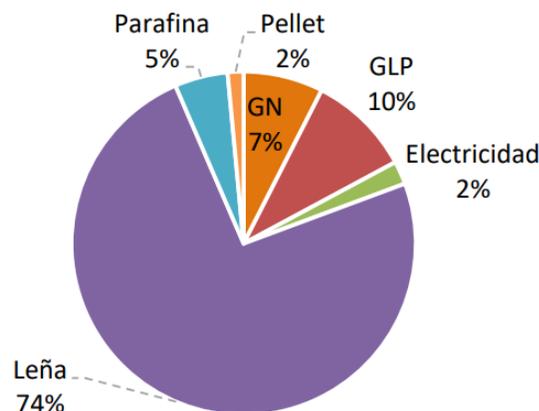


FIGURA 1. Porcentaje de consumo de energía para calor y frío, en el sector residencial (CDT, In-Data SpA, 2019).

Se observa que la mayor parte de la población utiliza leña para concepto de calefacción (74%). En estas ciudades se han aplicado planes de descontaminación ambiental (PDA), que buscan recuperar los niveles de calidad de aire señalados en normas ambientales vigentes (Ministerio de medio ambiente, 2018). Para esto, una de sus principales campañas ha sido el recambio de calefactores, buscando ampliar el uso de elementos más eficientes para calefacción. Sin embargo, a pesar de ello, los índices de uso de leña como combustible principal siguen siendo altos.

Osorno y Temuco también son ciudades con altos índices de contaminación, debido al uso de leña. En estas tres localidades (Coyhaique, Osorno y Temuco), la contaminación por MP2.5 es responsable de 4500 muertes de personas al año (Boso et al, 2019). Adicionalmente, según la OMS, estas tres ciudades están entre las 20 ciudades más contaminadas de América, en términos de emisiones de MP2.5 (Plataforma urbana del medio ambiente, 2016).

Acorde con el ministerio del medio ambiente (2018), el combustible más utilizado para las zonas térmicas 5 y 7 es la leña no certificada. En dicho informe se indica que en la zona térmica 5 (Osorno y Temuco) y en la zona térmica 7 (Coyhaique) un 78.5% y un 90.7% de las viviendas, respectivamente, no usa leña certificada. Esto quiere decir que el mayor consumo de combustible en estas localidades se debe al uso de leña con un contenido de humedad por sobre el 25%. El contenido de humedad influye significativamente en el poder calorífico de la leña, puesto que transformar la humedad en vapor requiere un insumo de energía adicional. Acorde con Lunguleasa et al (2020), el poder calorífico de la leña disminuye linealmente con el contenido de humedad. A lo anterior se suma una mayor liberación de MP_{2.5}.

De lo anterior, queda en evidencia el problema de contaminación atmosférica generado por los sistemas de combustión a leña. Claramente esto está influenciado por el tipo de clima, características arquitectónicas y constructivas de las viviendas y de su envolvente térmica. De esta forma se requieren métodos que puedan generar una solución sustentable, de modo de aprovechar al máximo nuestro entorno; esto puede traducirse en la incorporación de arquitectura pasiva, la cual busca captar la energía solar a partir de la estructura misma de la vivienda. Una forma que se ha venido estudiando en nuestro país es la incorporación de un muro Trombe. En la investigación realizada por Agurto et al. (2020) se estimó que el ahorro de energía fue de un 25.5% para un clima de valle central y de un 44.14% para un clima costero (obtenido a partir de experimentos realizados en la región del Bio Bio). Los ahorros de energía dependen directamente de las condiciones climáticas del lugar en el que se ubica la vivienda, por lo que cada zona climática puede tener su propio diseño de muro Trombe.

La Figura 2 presenta un esquema del sistema mencionado. El cristal (o vidrio) deja pasar la radiación de onda corta para calentar el muro, produciendo un efecto invernadero en la zona ubicada entre el cristal y el muro Trombe. La energía térmica recibida por el muro se transfiere por convección y/o radiación infrarroja hacia el interior de la vivienda.

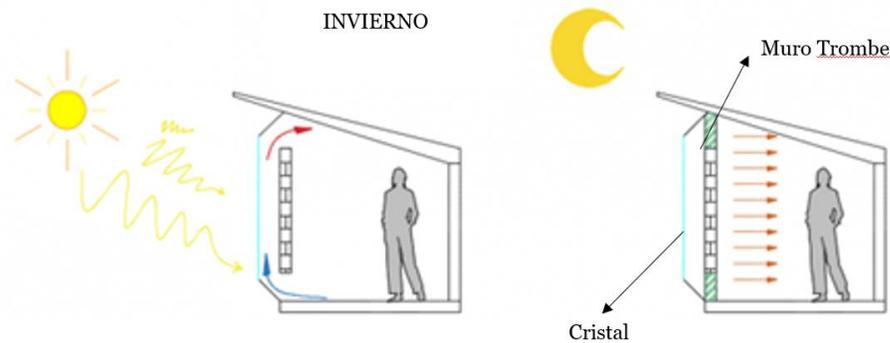


FIGURA 2. Principio de funcionamiento de un Muro Trombe (Taagapera, R., 2000).

En la literatura se pueden encontrar múltiples estudios que consideran el uso de muro Trombe, con el objetivo de mejorar la eficiencia energética en las viviendas. Este tipo de sistema no permite reemplazar completamente los sistemas de calefacción activos, pero sí logran reducir su consumo (Liu et al, 2013). El desempeño de estos sistemas pasivos se puede mejorar combinándolos con otros dispositivos, como lo realizaron Ma et al. (2018) al combinarlos con una ventana extra y un sistema de ventilación mecánica. Esto permitió mejorar la transferencia de calor del muro Trombe hacia la habitación, logrando mantener una temperatura constante de 18 °C sin necesidad de encender el sistema de calefacción. Rabani et al (2017) diseñaron un muro Trombe capaz de recibir radiación solar en tres direcciones, aumentando con esto la ganancia térmica diaria en un 16%. También se ha aprovechado la estructura del muro Trombe para generar otro tipo de ganancias, como las presentadas por Ji et al. (2009), quienes integraron celdas fotovoltaicas en las paredes para almacenar energía eléctrica.

En otro estudio en el que participó el autor de esta tesis (Agurto et al., 2020), se modificó la capacidad térmica del muro Trombe, utilizando un muro con tubos de PVC rellenos con agua para aumentar su capacitancia y con ello la energía acumulada por este muro. Algo similar realizaron Zhongting y Zhang (2020), quienes utilizan el muro Trombe para calentar el agua caliente sanitaria.

Entre los softwares utilizados para simular estos sistemas está TRNSYS, utilizado por Jaber y Ajib (2011) para simular una vivienda con muro Trombe, obteniendo una reducción de un 37% en demanda de calefacción. Shen et al. (2007) desarrollaron un modelo de un muro Trombe en TRNSYS, el cual fue comparado y validado con un modelo de diferencias finitas (FDM). Nowzari y Atikol (2009) estimaron un ahorro del 95% en una vivienda de 60 m² de superficie construida con un muro Trombe de 15 m² de superficie. En el trabajo realizado por Agurto et al. (2020), a pesar de haber evaluado un muro Trombe de alta capacitancia, no se realizó un estudio paramétrico para evaluar su efecto sobre el comportamiento de la vivienda y tampoco se evaluó el efecto del flujo de aire que circula entre el muro Trombe y el espacio acondicionado.

En esta investigación se propone continuar con el estudio desarrollado por Agurto et al. (2020). La solución propuesta consiste en un muro Trombe con diferentes capacitancias y en donde se evalúe el efecto del flujo de aire que circula entre este y la habitación colindante. Este sistema se evaluará en 3 ciudades: Coyhaique, Osorno y Temuco, que corresponden a las ciudades con mayor contaminación

atmosférica producto a la combustión de leña (calefacción). Con esto se hace evidente mencionar que la novedad de este estudio corresponderá a la incorporación de un elemento pasivo como potencial reductor de contaminantes en la zona sur del país, incorporando elementos de masa térmica: agua en tubos de PVC (1) y ladrillo (2). La idea es hacer una comparación entre un sistema convencional que usa ladrillos en el interior del muro Trombe (Briga et al, 2017) y un sistema que contenga agua en tubos de PVC, tal como se lo estudió Agurto et al. (2020). También se pretende establecer qué tipo de sistema de circulación de aire es el óptimo: flujo forzado o el flujo natural entre el muro Trombe y la habitación. Con esto se podrá verificar con cuál se logran mayores temperaturas en la habitación y cuál impone menores pérdidas térmicas. Ambos factores deberán ser analizados para justificar qué tipo de circulación permite una menor demanda de calefacción.

Debido a que un Muro Trombe no tiene la capacidad de calefaccionar toda una vivienda, sino que únicamente un espacio, en este estudio se analizará su efecto sobre el espacio más concurrido de una vivienda: el living-comedor.

1.2 Hipótesis y Objetivos

1.2.1 Hipótesis

La incorporación de un sistema pasivo de calefacción basado en un muro Trombe logra reducir la demanda de calefacción de un living-comedor de una vivienda en al menos un 20%.

1.2.2 Objetivos

1.2.2.1 Objetivo General

Evaluar mediante simulación numérica la demanda de calefacción y las emisiones de $MP_{2.5}$ asociadas al sistema de calefacción de un living comedor de una vivienda social con un muro Trombe, considerando las condiciones climáticas de tres ciudades del sur de Chile.

1.2.2.2 Objetivos Específicos

A partir del Objetivo General, se presentan los siguientes objetivos específicos para el desarrollo y validación de la hipótesis.

- 1) Desarrollar el modelo de simulación de la habitación en el software TRNSYS.
- 2) Desarrollar el modelo numérico del muro Trombe en el software TRNSYS.
- 3) Determinar las condiciones de operación del sistema que minimizan la demanda de calefacción.
- 4) Determinar los ahorros de emisiones de $MP_{2.5}$ al incorporar un muro Trombe a la habitación de una vivienda.

1.3 Metodología

Objetivo específico 1: 1) Desarrollar el modelo de simulación de la habitación en el software TRNSYS.

Primero, se debe caracterizar la habitación a considerar en este estudio: el living – comedor. Esto implica caracterizar los diferentes componentes de las paredes externas, definir cargas térmicas, infiltraciones, orientación. A lo anterior se deben agregar las características meteorológicas según la ubicación geográfica de cada localidad de estudio. Con estos datos y con ayuda de las normativas nacionales se determinarán las conductividades, densidades y calores específicos de los diferentes componentes de la vivienda. Se aplicará la reglamentación térmica vigente para definir las transmitancias de las diferentes paredes según la zona térmica donde se encuentre la ciudad considerada, siendo la zona térmica 5 para Temuco y Osorno y la zona térmica 7 para Coyhaique.

Con respecto a las condiciones meteorológicas a considerar, se consideran la temperatura ambiente, velocidad del viento, radiación solar, entre otros. Esta información se obtendrá del software Meteonorm.

A partir de la información recopilada, se construye el modelo en la plataforma TRNBUILD del software TRNSYS. Con los datos climáticos (valores de entrada) y la geometría de la vivienda se simula el comportamiento de esta en la zona de estudio.

La demanda en calefacción se determinará para una temperatura de confort de 18°C. Esta demanda se utilizará para determinar las emisiones de MP_{2.5}.

En síntesis, este objetivo específico permite hacer una evaluación de la habitación de estudio sin incorporar el muro Trombe, determinando su perfil de temperatura, demanda en calefacción y emisiones de contaminantes.

Objetivo específico 2: Desarrollar el modelo numérico del muro Trombe en el software TRNSYS.

En el estudio realizado por Agurto et al. [10], se utilizó la plataforma TRNBUILD para definir el modelo del muro Trombe. Lo que se propone actualmente es realizarlo en la plataforma TRNSYS Studio, definiendo los elementos de masa térmica, flujos de aire y superficies vidriadas. Para esto se utiliza el modelo Type 36c y 36b, los cuales difieren por trabajar con un flujo forzado y natural, respectivamente. Este modelo se debe acoplar al modelo de la vivienda desarrollado en TRNBUILD.

En esta etapa se deben definir los materiales, dimensiones y elementos de masa térmica del muro Trombe. Adicionalmente, se debe definir las condiciones de circulación de aire: natural y forzado.

Esta etapa permite incorporar el muro Trombe a la habitación estudiada.

Objetivo específico 3: Determinar las condiciones de operación del sistema que minimizan la demanda de calefacción.

A partir de los resultados presentados en el objetivo específico 2 se buscará la combinación de flujo de aire entre habitación y muro Trombe y tipo de masa térmica que minimiza la demanda de

calefacción.

Para esto se compararán los resultados obtenidos a partir de un flujo pasivo y un flujo forzado con las distintas condiciones de masa térmica. Se realizará una comparación con los resultados promedios mensuales y, cuando se requiera profundizar más, se evaluarán los resultados de forma horaria.

A partir de esto se espera encontrar las mejores condiciones para el funcionamiento del muro Trombe.

Objetivo específico 4: Determinar los ahorros de emisiones de MP_{2.5} al incorporar un muro Trombe a la habitación de una vivienda.

A partir de los resultados obtenidos en el objetivo específico 3, se debe determinar el ahorro de emisiones de MP_{2.5}. Estas emisiones se calcularán utilizando la metodología presentada por greenlabUC (2016), las cuales en función de la demanda de calefacción y, en base a un rendimiento promedio de los artefactos de calefacción utilizados en cada localidad, se podrá determinar el flujo de combustible (leña) utilizado por vivienda. Mediante un factor, que depende de la humedad de la leña, se podrá determinar la cantidad de emisiones de MP_{2.5}, el cual está en función de la cantidad de combustible utilizado.

Con este objetivo específico se espera hacer una comparación entre las distintas configuraciones de muro Trombe y poder analizar cuál escenario es que el que genera menores emisiones de material particulado de 2.5 micrones de diámetro



CAPÍTULO 2

Condiciones de Borde

2.1 Caracterización de localidades

En este estudio se consideran 3 ciudades, cuyas radiaciones solares mensuales promedio y temperaturas exteriores promedios mensuales se muestran en la Figura 3 y Figura 4, respectivamente. Adicionalmente, la Tabla 1 presenta la clasificación de Köppen y las características de cada localidad.

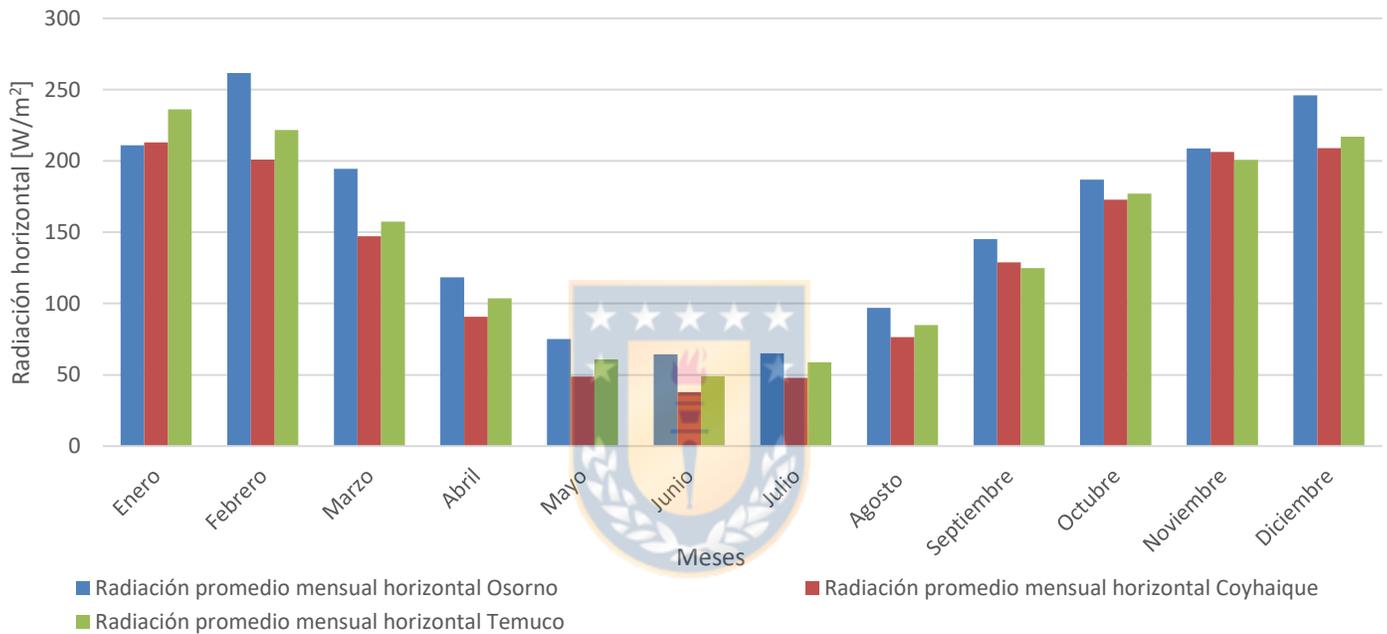


FIGURA 3. Radiación solar promedio mensual sobre una superficie horizontal para las localidades de estudio [Confección propia].

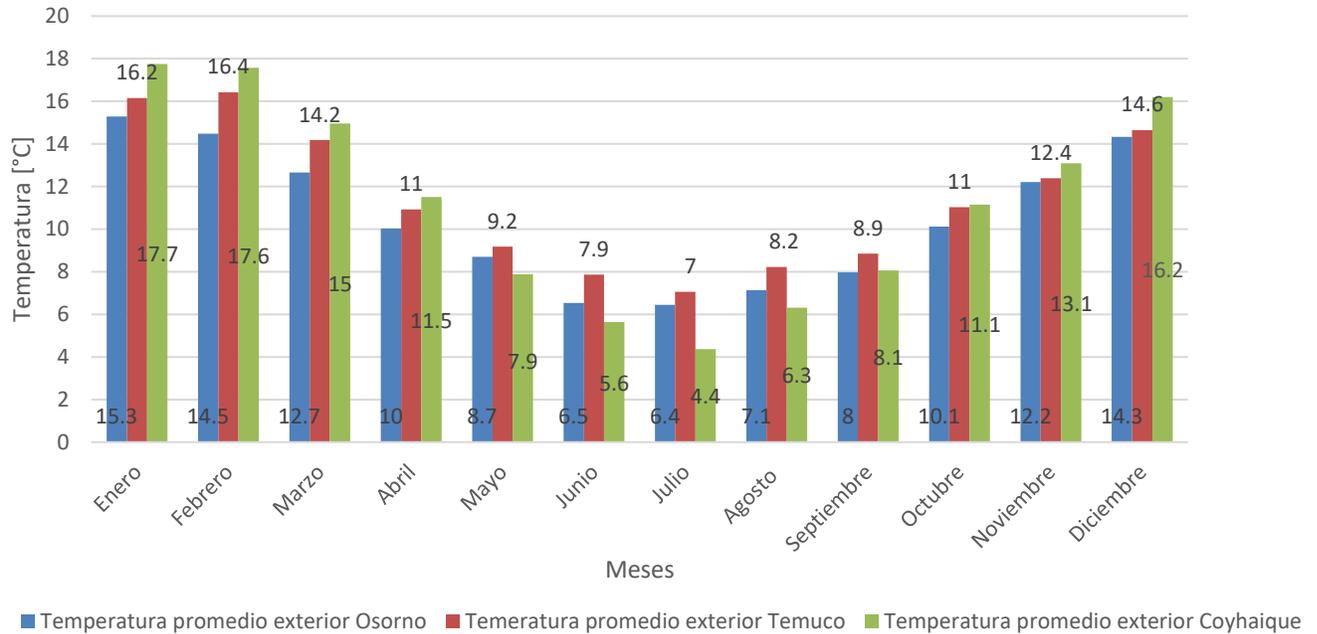


FIGURA 4. Temperatura exterior promedio mensual para las localidades de estudio [Confección propia].

TABLA 1. Clasificación Köppen y características meteorológicas de las ciudades de estudio.

Ciudad	Clasificación Köppen	Características
Temuco	Csb	El clima es templado y generalmente cálido. Los inviernos son más lluviosos que los veranos.
Osorno	Cfb	El clima se clasifica en cálido y templado. Lluve mucho, incluso en los meses más secos.
Coyhaique	Cfb	El clima es cálido y templado. Hay precipitaciones durante todo el año.

Otra variable importante de las ciudades en estudio es su nivel de concentración de material particulado MP_{2.5}. La Figura 5 presenta las concentraciones promedio mensuales de MP_{2.5} para un período de un año. De ella se visualiza que su producción aumenta en el periodo de invierno, siendo Coyhaique la localidad que presenta mayores niveles de emisión de MP_{2.5}, con un promedio de 65.6 [µg/m³] para el período de otoño – invierno. Esto tiene sentido considerando que Coyhaique tiene la menor temperatura promedio ambiental en dicho periodo.

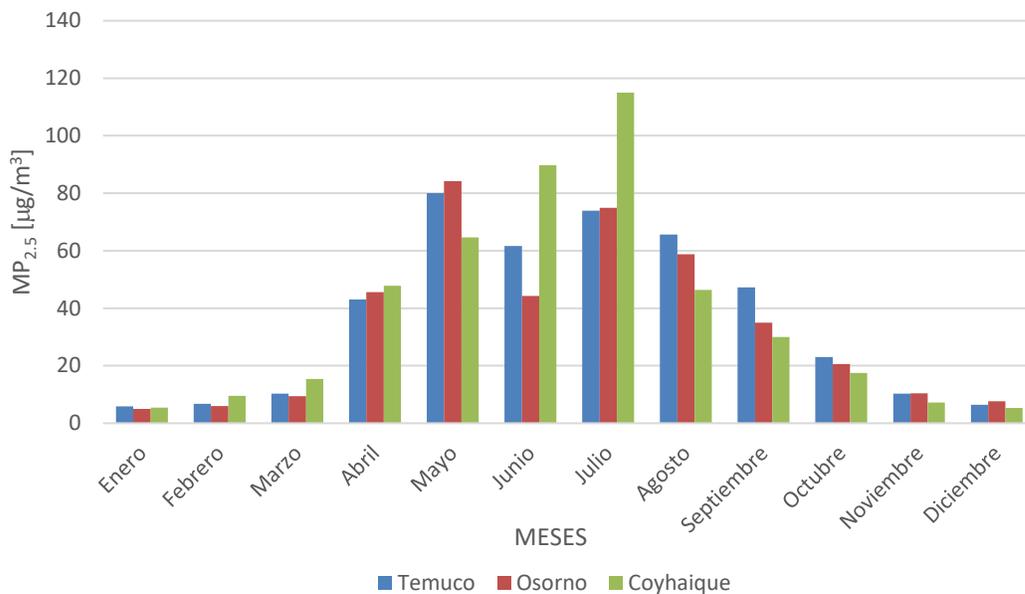


FIGURA 5. Emisión promedio mensual MP_{2.5} [Confección propia].

La Tabla 2 presenta los diferentes niveles de concentración de material particulado MP_{2.5} considerados en el Decreto 12 (Norma primaria de calidad ambiental para material particulado fino respirable MP 2.5) [31] para definir el nivel de contaminación de una ciudad. Estos valores consideran un periodo de 24 horas.

TABLA 2. Niveles de calidad ambiental según la concentración de MP_{2.5} (Ministerio del medio ambiente, 2011).

Nivel	Concentración 24 horas MP 2.5 [µg/m³]
Alerta	80 – 109
Preemergencia	110 – 169
Emergencia	170 o superior

Los niveles de calidad ambiental se determinan en base a los datos presentados en la Tabla 2 y la Figura 5 (Decreto 12 [31]). Al realizar este cruce, se obtienen los resultados presentados en la Tabla 3, de donde se observa que Coyhaique es la ciudad que presenta mayores estados de alerta y emergencia, mientras que Temuco tiene la mayor cantidad de casos de preemergencia.

TABLA 3. Escenarios en localidades de estudio en base a la calidad del aire [Confección propia].

Localidad	Alerta	Preemergencia	Emergencia
Temuco	21	17	6
Osorno	13	16	6
Coyhaique	39	16	9

2.2 Descripción de la habitación de estudio

La configuración global utilizada en este estudio tiene las mismas características que la utilizada por Agurto et al. (2020), con un muro Trombe adosado a una habitación de una vivienda social. La habitación considerada es el living-comedor.

Las características de la envolvente de la habitación considerada se deben ir ajustando de acuerdo a la zona térmica donde se encuentre la ciudad. La Tabla 4 muestra un resumen de las características que debe tener la envolvente para cumplir con la normativa térmica vigente. Debemos recordar que Coyhaique se encuentra en la zona térmica 7 y que Osorno y Temuco se encuentran en la zona térmica 5.

TABLA 4. Transmitancia térmica mínima de la envolvente.

Zona térmica	Complejo techo		Muros		Pisos ventilados	
	U _{max}	T _{rmin}	U _{max}	T _{rmin}	U _{max}	T _{rmin}
	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	4.00	0.25	3.60	0.28
2	0.69	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 Figura 6 presenta un esquema de la sección de estudio, mientras que la Figura 7 contiene el detalle indicado en la Figura 6. Adicionalmente, la Figura 8 presenta una vista en planta.

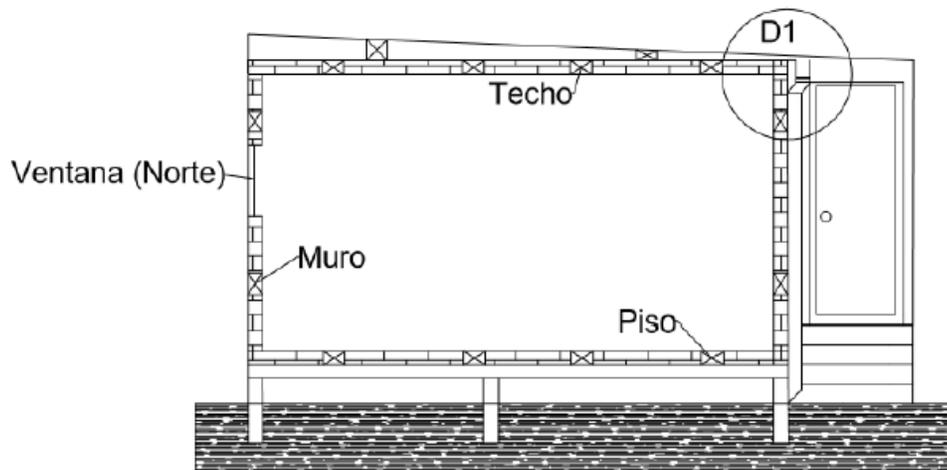


FIGURA 6. Esquema módulo de estudio [Confección propia].

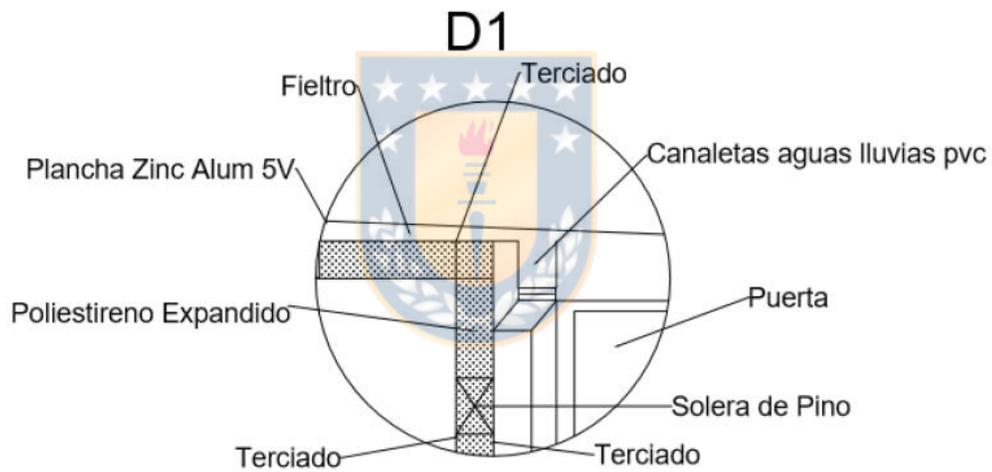


FIGURA 7. Detalle D1 [Confección propia].

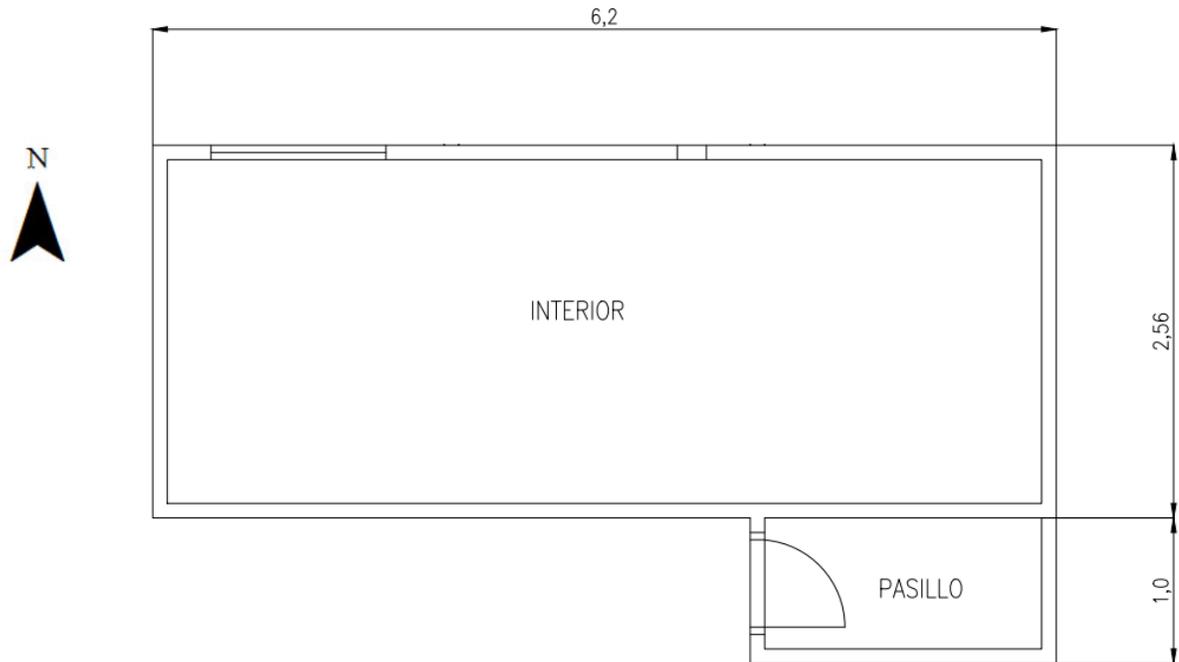


FIGURA 8. Vista en planta módulo de estudio [Confección propia].

Las Tabla 5 y Tabla 6 presentan las características de las paredes de la sección de estudio. Notar que la composición está especificada para alcanzar el coeficiente global de transferencia de calor. Este se calcula internamente por el software TRNSYS.

TABLA 5. Características de la envolvente de la habitación de estudio para Temuco y Osorno [Confección propia].

Zona	Volumen [m³]	Componentes	Orientación	Composición	Espesor [mm]	Coefficiente global de transferencia de calor [W/m²K]
Interior	45	Pared exterior	Norte, Oeste	OSB	10	1.6
				Poliestireno	15	
		Pared interior	Sur, Este	OSB	10	0.6
				Poliestireno	60	
		Techo	Horizontal	OSB	10	0.33
				Poliestireno	120	
		Piso	De Borde	OSB	10	0.50
Poliestireno	75					
Puerta	Adyacente Pasillo	Madera	-	1.8		

TABLA 6 Características de la envolvente de la habitación de estudio para Coyhaique [Confección propia].

Zona	Volumen [m ³]	Componentes	Orientación	Composición	Espesor [mm]	Coefficiente global de transferencia de calor [W/m ² K]
Interior	45	Pared exterior	Norte, Oeste	OSB	10	0.6
				Poliestireno	60	
		Pared interior	Sur, Este	OSB	10	0.6
				Poliestireno	60	
		Techo	Horizontal	OSB	10	0.25
				Poliestireno	110	
		Piso	De Borde	OSB	10	0.37
				Poliestireno	100	
Puerta	Adyacente Pasillo	Madera	-	1.8		

2.3 Incorporación del muro Trombe al módulo de estudio

En este capítulo se presentan las características del muro Trombe a instalar en la habitación de estudio. Se utilizan las mismas dimensiones del muro Trombe analizada por Agurto et al. (2020), las que se resumen en la Tabla 7.

TABLA 7. Dimensiones del muro Trombe.

Parámetro	Valor
Altura del muro [m]	2.2
Ancho del muro [m]	2.2
Espesor de la prótesis [m]	0.2
Conductividad del muro [kJ/hmK]	0.4

La Figura 9, Figura 10 y Figura 11 presentan más detalles del muro Trombe instalado en la habitación de estudio.

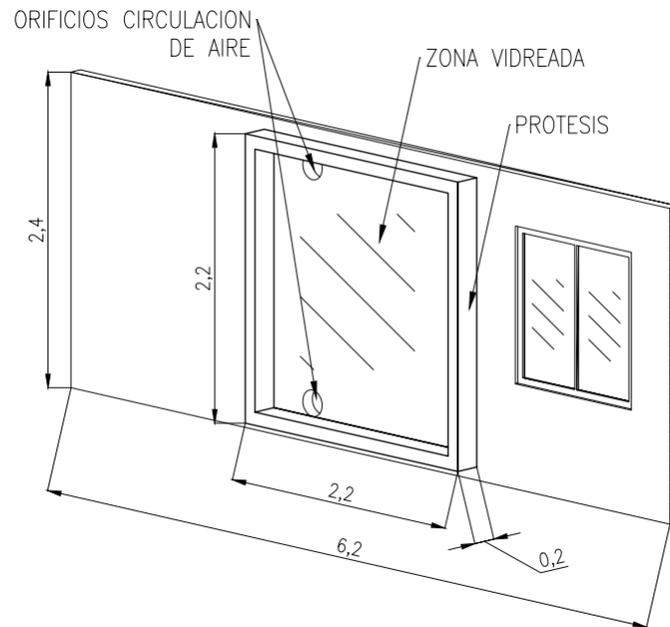


FIGURA 9. Muro Trombe instalado en la fachada norte de la habitación de estudio [Confección propia].

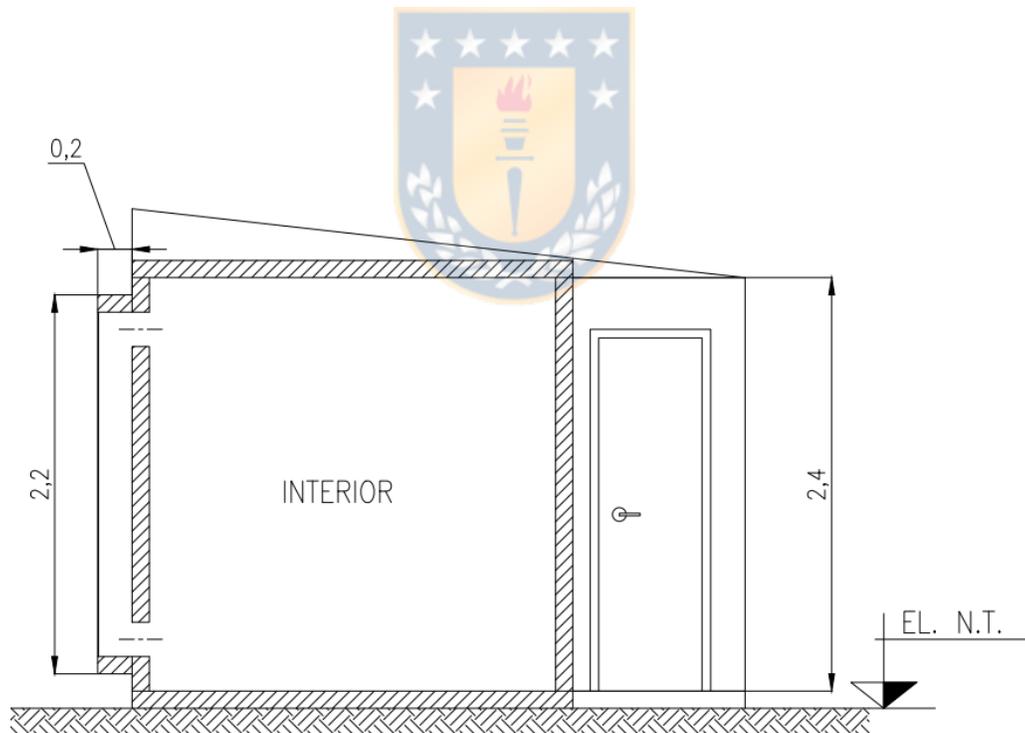


FIGURA 10. Vista en corte del muro Trombe en el módulo de estudio [Confección propia].

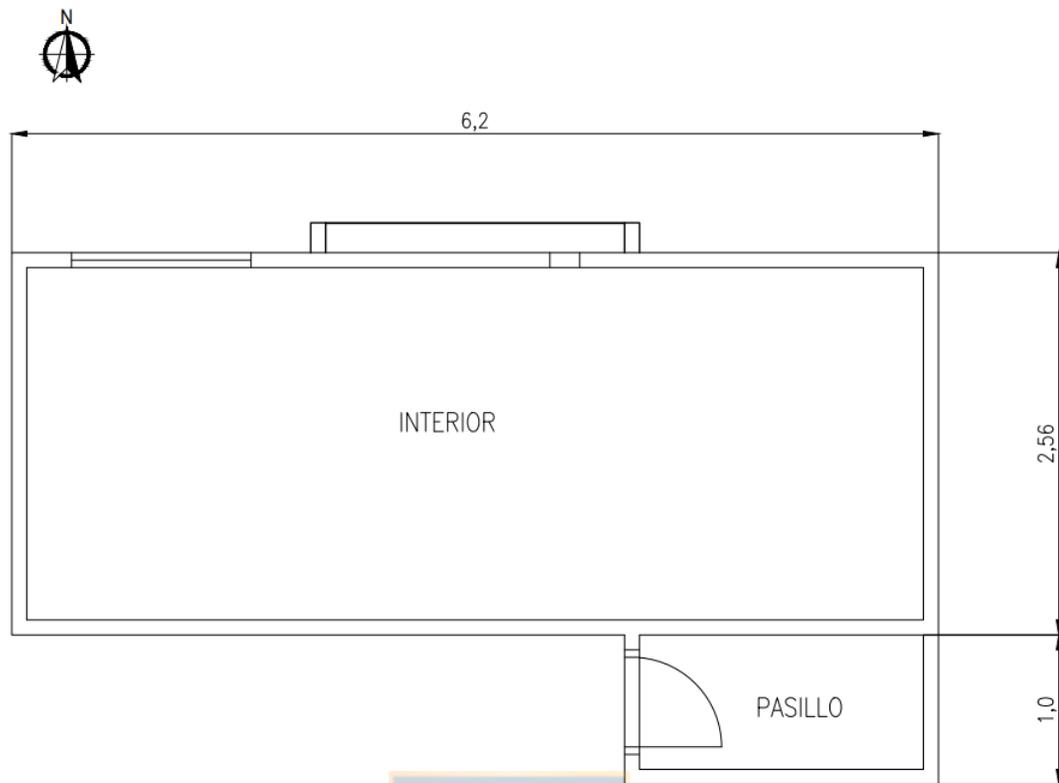


FIGURA 11. Vista en planta del muro Trombe en el módulo de estudio [Confección propia].

Se consideran 3 tipos de materiales para el muro Trombe, los cuales se detallan en la Tabla 8. El primero corresponde a un muro Trombe sin ningún elemento de masa térmica adicional. El segundo caso considera ladrillos en el espacio divisor entre el muro Trombe y la habitación, y el último caso considera agua dentro de tubos de PVC en el espacio divisor entre el muro Trombe y la habitación.

TABLA 8. Características de materiales usados en el muro Trombe

Caso	Elementos	Conductividad promedio [kJ/hmK]	Capacitancia específica [kJ/m³K]	Espesor[m]
<i>Trombe 1</i>	Ladrillo	0.37	933	0.147
<i>Trombe 2</i>	Agua en PVC	0.41	2800	0.183

2.3.1 Circulación de aire entre el muro Trombe y habitación

Se consideran dos tipos de circulación de aire entre el muro Trombe y la habitación de estudio: circulación natural y forzada.

2.3.2 Caso de estudio circulación forzada

Para la circulación forzada se consideran 3 flujos máxicos de aire: *Flujo Forzado 1*: 10 kg/h, *Flujo Forzado 2*: 30 kg/h, *Flujo Forzado 3*: 60 kg/h. Con esto se hace el supuesto que hay un ventilador funcionando de forma permanente para distintos escenarios.

2.3.3. Caso de estudio circulación natural

Para la circulación natural se consideran 3 casos con diferentes áreas de apertura, las cuales se ubican a una diferencia de altura constante de 1.7 m. Las dimensiones de las áreas de apertura se presentan en la Tabla 9.

TABLA 9. Casos de estudio para condición de flujo natural.

Casos	Area [m²]	Diámetro equivalente [m]
<i>Flujo natural 1</i>	0.038	0.110
<i>Flujo natural 2</i>	0.05	0.126
<i>Flujo natural 3</i>	0.07	0.149

2.4 Simulación en TRNSYS

La simulación de la habitación y el muro Trombe se realiza en TRNSYS, la cual considera una simulación de 5106 horas con un paso de tiempo de 1 hora, abarcando los meses de Marzo a Septiembre

CAPÍTULO 3

Modelo

3.1. Modelo de la habitación

La habitación es modelada con el Type 56 de TRNSYS, el cual corresponde a un modelo integrado del software que permite realizar un balance térmico en la zona de estudio, permitiendo determinar la demanda de calefacción en dicha zona. Se considera una temperatura de confort de 18 °C para determinar la demanda de calefacción, al igual que en el estudio de Agurto et al (2020).

Se consideran las materialidades descritas en las Tablas 5 y 6. Para los muros adyacentes a otra habitación de la vivienda se considera que tiene una temperatura idéntica a la de la habitación simulada. Para el piso se considera una temperatura como condición de borde igual a la temperatura promedio exterior de todo el periodo de estudio.

3.2 Modelación del muro Trombe

El muro Trombe se modela con el *Type 36c* para la circulación de aire forzada y con el *Type 36b* para la circulación de aire natural, ambos con el software TRNSYS 16.

TRNSYS realiza el cálculo a través de una secuencia de resistencias, tal como se indica en la Figura 12. Este modelo depende de las condiciones exteriores (temperatura ambiente y radiación). A partir de la radiación, convección y elementos constructivos definidos, se puede determinar la temperatura en la zona vidriada interior (T_g), la temperatura del borde del muro Trombe (T_1) y la temperatura media de la zona de aire (T_m). Además, se debe definir la estrategia de intercambio de energía con el aire (γ), en donde **-1** aplica para un intercambio de aire con el exterior del recinto, **0** sin intercambio y **1** indica un intercambio con la habitación colindante. Es en este último punto ($\gamma=1$) en donde se define si el intercambio es por medio de circulación forzada (*Type 36c*) o por circulación natural (*Type 36b*).

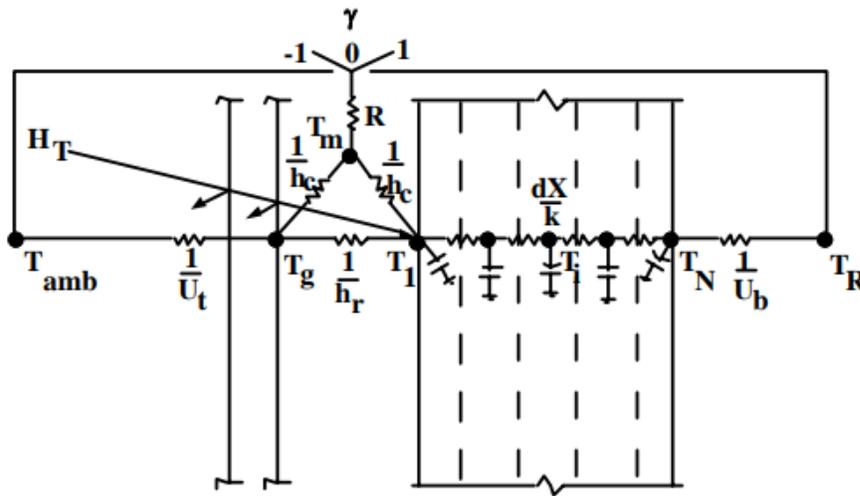


FIGURA 12. Principio del modelo del muro Trombe en TRNSYS (Mathematical Reference, TRNSYS 6).

Adicionalmente, la Figura 13 presenta la estrategia de simulación a realizar en TRNSYS 16. Como se menciona anteriormente, la diferencia de cálculo entre el *Type 36c* y el *Type 36b* radica en que en el primero el flujo de aire se ingresa como un input, mientras que en el segundo se calcula internamente en función de la densidad promedio y el área de abertura, tal como se indica en las ecuaciones (1) y (2).

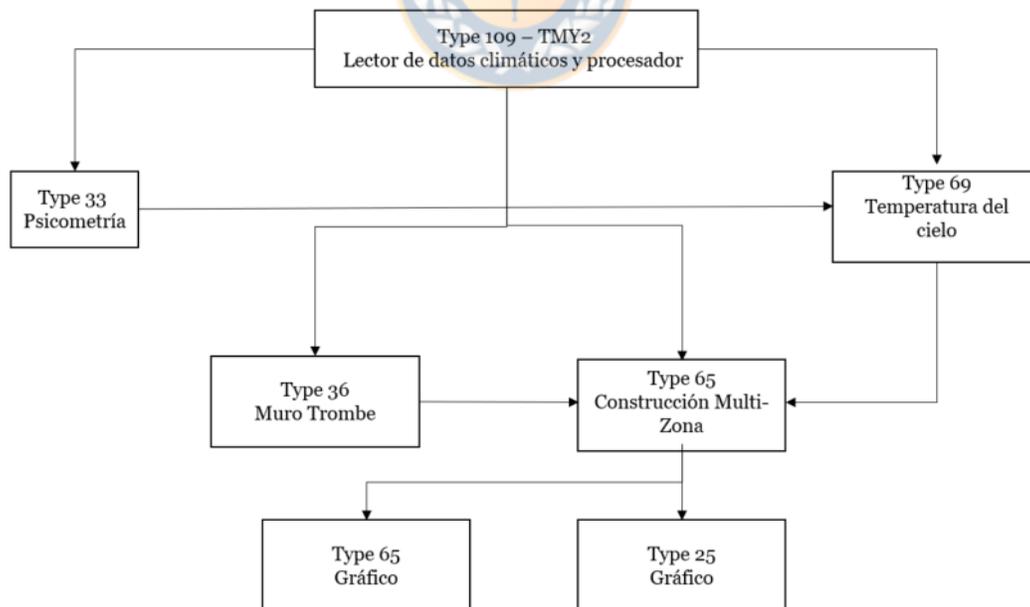


FIGURA 13. Estrategia de simulación TRNSYS [Confección propia].

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot h}{\left(C_1 \cdot \left(\frac{A_g}{A_v}\right)^2 + C_2\right)}} \cdot \frac{(T_m - T_R)}{|T_m|} \quad (1)$$

$$\dot{m} = \bar{v} \bar{\rho} A_g \quad (2)$$

Los parámetros, variables de entrada y salidas del modelo del muro Trombe (type 36) se describen en la Tabla 10.

TABLA 10. Variables de entrada y salida del Type 36 [Confección propia].

Parámetros	VARIABLES DE ENTRADA	VARIABLES DE SALIDA
Altura del Muro	Temperatura del módulo	Flujo de energía hacia el módulo
Ancho del Muro	Temperatura ambiente	Razón de cambio de energía interna
Espesor Muro colindante	Velocidad del viento	Razón de absorción solar
Conductividad del Muro	Coef. Pérdida con el exterior	Pérdidas térmicas
Capacitancia específica del muro	Coef. pérdida con el interior	Transferencia de calor desde el muro colindante hacia el modulo
Absorción solar del muro	Radiación total	Transferencia de calor desde el vidrio hacia el ambiente
Emitancia del muro	Radiación difusa	Flujo de energía en ventilación
Emitancia del vidrio	Ángulo de incidencia	Razón de flujo de aire
Número de vidrios	Diámetro de apertura y distancia entre orificios (type 36b)	Temperatura de aire de salida del muro Trombe
Espacio entre el muro colindante y el vidrio	Flujo de aire hacia el modulo (type 36c)	

3.3 Emisiones MP_{2.5}

El desarrollo del modelo de emisiones de MP_{2.5} está basado en la guía elaborada por greenlabUC (2016), la cual considera la emisión de material particulado según el tipo de tecnología y cantidad de combustible utilizado.

La Tabla 11 presenta los factores de emisión MP_{2.5} para varios artefactos a leña domiciliarios. Se considera leña húmeda con un contenido de humedad por sobre 25%.

TABLA 11. Factores de emisión de MP_{2.5} para combustión de leña en equipos residenciales [g/kg de leña] (GreenlabUC, 2016)

Artefacto de Combustión	Leña húmeda
Cocina a leña	13.0
Combustión lenta sin templador	11.0
Combustión lenta con templador	10.2
Salamandra	34.1

Las emisiones anuales se determinan con la ecuación (3), propuesta por Avendaño (2019) para un determinado artefacto de combustión y consumo de leña.

$$E_i = E_{i,j} * C_i \quad (3)$$

3.3.1 Estimación de las emisiones de MP_{2.5} para el caso de estudio

Para determinar las emisiones de MP_{2.5} del caso de estudio de cada localidad se debe conocer el tipo de artefacto de calefacción utilizado, el rendimiento del artefacto de calefacción, el combustible utilizado y el poder calorífico del combustible.

3.3.2 Artefactos de calefacción más utilizados

La Tabla 12 presenta los porcentajes de uso de artefactos de calefacción para las localidades de Temuco, Osorno y Coyhaique. Estos datos fueron obtenidos dentro del marco del Programa de Descontaminación Ambiental (PDA).

TABLA 12. Porcentajes de uso de artefactos de calefacción para cada ciudad [Ministerio del medio ambiente 2009 y 2011, Diaz et al, 2013).

Tipo de artefacto	Porcentaje de uso en Temuco [%]	Porcentaje de uso en Osorno [%]	Porcentaje de uso en Coyhaique [%]
Cocina a leña	28.4	50	38
Salamandra	3.9	3.7	6
Combustión lenta sin templador	16.1	10.6	37
Combustión lenta con templador	51.6	30.5	19
Otros artefactos	0	3.0	0

Se observa que la combustión lenta predomina en la localidad de Temuco, mientras que la cocina a leña es la que posee mayor porcentaje para Osorno y Coyhaique.

Para este estudio se considerará el artefacto con mayor porcentaje de stock por localidad, que en este caso corresponde a una estufa de combustión lenta para Temuco y cocina a leña para Osorno y Coyhaique.

El rendimiento de cada artefacto de combustión se determina a partir de su rendimiento nominal, el rendimiento del sistema de distribución y del sistema de control (Ministerio energía, 2019). La Tabla 13 presenta los rendimientos asociados a los sistemas de distribución y la Tabla 14 los rendimientos asociados a los sistemas de control (Ministerio energía, 2019).

TABLA 13. Rendimiento de los sistemas de distribución (Ministerio de Energía, 2019).

Sistema de distribución	Rendimiento [-] (η_{sd})
Sistema unitario autocontenido	1
Vivienda unifamiliar con sistema centralizado	0.97
Edificio con sistema centralizado	0.95
Sistema de calefacción distrital	0.80

TABLA 14. Rendimiento del sistema de control (Ministerio de Energía, 2019).

Sistema de control	Rendimiento [-] (η_{sc})
Control automático	1
Control manual	0.80

El rendimiento del sistema completo se determina con la ecuación (4), la cual es utilizada en la planilla de cálculo de la Calificación Energética de Viviendas (2019).

$$\eta_{sistema} = \eta_{nom} \cdot \eta_{sd} \cdot \eta_{sc} \quad (4)$$

La Tabla 15 contiene los rendimientos nominales de cada artefacto de calefacción, como también el rendimiento de distribución y sistema de control considerado y el rendimiento global del sistema para cada localidad de estudio.

TABLA 15. Rendimientos considerados para cada localidad [Confección propia].

Artefacto de combustión	Rendimiento nominal (η_{nom}) [-]	Rendimiento sistema de distribución (η_{sd}) [-]	Rendimiento sistema de control (η_{sc}) [-]	Rendimiento del sistema ($\eta_{sistema}$) [-]	Localidad
Combustión lenta con templador	0.68 (Bosca, 2020)	1.00	0.80	0.54	Temuco
Cocina a leña	0.70 (Farías et al. 2017)	0.97	0.80	0.63	Osorno, Coyhaique

Finalmente, el consumo de combustible se determina con la ecuación (5), que depende de la demanda de calefacción, el rendimiento del sistema y el poder calorífico inferior de la leña.

$$C = \frac{\dot{Q}_{cal}}{\eta_{sistema} * PCI} \quad (5)$$

CAPÍTULO 4

Simulación

4.1 Simulación para circulación natural

En el caso de una circulación natural, los mejores resultados se obtienen para el caso *Flujo natural 3*, el cual es presentado en la Tabla 16 para los casos de *Trombe 1 (Ladrillos)* y *Trombe 2 (agua en PVC)*. De estos se observa que para todo el periodo considerado *Trombe 2 (agua en PVC)* presenta la menor demanda de calefacción para las 3 ciudades consideradas.

TABLA 16. Demanda de calefacción para *Flujo natural 3*, casos *Trombe 1* y *Trombe 2*, kWh.

Mes	Caso y ciudad	
	<i>Trombe 1</i>	<i>Trombe 2</i>
	Temuco/Osorno/Coyhaique	Temuco/Osorno/Coyhaique
Marzo	56 / 74.6 / 6.6	33.2 / 50.5 / 1.7
Abril	158 / 169.6 / 71.4	139.8 / 160.8 / 62.7
Mayo	249.5 / 284.2 / 192.8	245 / 280.9 / 192.4
Junio	296.3 / 344 / 241.1	300 / 347.1 / 246.1
Julio	327.6 / 366 / 255.4	329.3 / 371.3 / 263
Agosto	249.8 / 287.6 / 177.7	244.8 / 288.5 / 180.7
Septiembre	172.5 / 198.1 / 79.7	159.6 / 188.9 / 67.7
Total	1509.8 / 1724 / 1024.7	1451 / 1688 / 1014.4

4.2 Resultados para circulación forzada

El mejor resultado para el caso de circulación forzada fue obtenido para el caso *Trombe 2* y para los flujos de 30 kg/h y 60 kg/h. La demanda de calefacción para esta condición se presenta en las Tablas 17 y 18 para un flujo de aire de 30 kg/h y 60 kg/h, respectivamente.

TABLA 17. Demanda de calefacción, en kWh, para una circulación forzada y un flujo de 30 kg/h-

Mes/Caso/Ciudad	<i>Trombe 1</i>	<i>Trombe 2</i>
	Temuco/Osorno/Coyhaique	Temuco/Osorno/Coyhaique
Marzo	55.4 / 74.5 / 6.7	37.7 / 54.8 / 2.4
Abril	159.1 / 171.2 / 72.9	144.3 / 164.6 / 64.8
Mayo	253 / 287.8 / 198.3	247.8 / 281.9 / 194
Junio	301.3 / 350 / 247.7	301.9 / 349.1 / 247.5
Julio	332.7 / 372 / 262.6	331.6 / 372.4 / 264.5
Agosto	253.5 / 291.5 / 182.2	249.9 / 290.9 / 182.6
Septiembre	174.2 / 200.6 / 81.1	165.9 / 193.9 / 71.9
Total	1529.2 / 1747.8 / 1051.5	1479.1 / 1707 / 1027.7

TABLA 18. Demanda de calefacción, en kWh, para una circulación forzada y un flujo de 60 kg/h

Mes/Caso/Ciudad	Trombe 1	Trombe 2
	Temuco/Osorno/Coyhaique	Temuco/Osorno/Coyhaique
Marzo	54.8 / 73.5 / 6.5	34.2 / 50.4 / 1.7
Abril	158.6 / 170.2 / 72.3	140.8 / 160.5 / 62.4
Mayo	253.1 / 288.3 / 199.8	246.4 / 281 / 194.7
Junio	302.1 / 351.5 / 250.4	302 / 350.2 / 250
Julio	333.5 / 372.9 / 265.1	331.2 / 372.9 / 266.6
Agosto	253 / 291.1 / 182.1	246.9 / 288.6 / 180.8
Septiembre	173 / 199 / 80.2	161.2 / 189 / 67.7
Total	1528 / 1746 / 1056.4	1462.7 / 1692.6 / 1024

En el Anexo A se presentan los resultados gráficos para las simulaciones del caso de circulación forzada.

4.2 Comparación de resultados entre circulación natural y forzada

La Tabla 19 presenta la comparación de resultados entre el caso base sin muro Trombe, con respecto al mejor caso de flujo forzado y el mejor caso de flujo natural. Para el caso de circulación forzada, el mejor caso fue para un flujo de aire de 30 kg/h (*Trombe 2*), mientras que para la circulación natural corresponde a la combinación *Trombe 2* y *Flujo natural 3*.

TABLA 19. Comparación de demanda de calefacción (kWh) para el caso base y los mejores casos de circulación natural y forzada.

Mes/Caso/Ciudad	Caso base sin muro Trombe	Mejor caso circulación forzada	Mejor caso circulación natural
	Temuco/Osorno/Coyhaique	Temuco/Osorno/Coyhaique	Temuco/Osorno/Coyhaique
Marzo	126.9 / 151.9 / 61.8	34.2 / 50.4 / 1.7	33.1 / 50.5 / 1.7
Abril	210.7 / 223.7 / 130.1	140.8 / 160.5 / 62.4	139.8 / 160.8 / 62.7
Mayo	274 / 302.9 / 214.1	246.4 / 281 / 194.7	244.9 / 280.9 / 192.4
Junio	301.6 / 339.9 / 244.2	302 / 350.2 / 250	300 / 347.1 / 246.1
Julio	339.6 / 367.4 / 265.7	331.2 / 372.9 / 266.6	329.3 / 371.3 / 263
Agosto	290.8 / 319 / 223.6	246.9 / 288.6 / 180.8	244.8 / 288.5 / 180.7
Septiembre	234.1 / 259.3 / 157.9	161.2 / 189 / 67.7	159.5 / 188.9 / 67.7
Total	1777.6 / 1964 / 1297.3	1462.7 / 1692.6 / 1024	1451.7 / 1688 / 1014.4

Según los resultados presentados en la Tabla 19, el flujo natural genera la menor demanda de calefacción en las tres localidades consideradas en este estudio.

Las emisiones de $MP_{2.5}$ siguen la misma tendencia que la demanda de calefacción, puesto que las emisiones son proporcionales al consumo de combustible y el consumo de combustible es proporcional a la demanda de calefacción. La Tabla 20 presenta las emisiones de $MP_{2.5}$ para el caso base y la combinación *Flujo natural 3* y *Trombe 2*.

TABLA 20. Comparación de emisiones de MP_{2.5} entre el caso base y el caso para la combinación *Flujo natural 3* y *Trombe 2*.

Mes	Caso/Ciudad	
	Caso base sin muro Trombe	Mejor caso circulación natural (<i>Flujo natural 3, Trombe 2</i>)
	Temuco/Osorno/Coyhaique	Temuco/Osorno/Coyhaique
Marzo	133.2 / 159.5 / 64.9	34.8 / 53 / 1.8
Abril	221.2 / 234.8 / 136.6	146.9 / 168.8 / 65.8
Mayo	287.6 / 318.1 / 224.8	257.2 / 294.9 / 202
Junio	316.7 / 356.8 / 256.4	315 / 364.5 / 258.4
Julio	356.5 / 385.8 / 279	345.8 / 389.9 / 276.1
Agosto	305.3 / 335 / 234.8	257.1 / 302.9 / 189.8
Septiembre	245.8 / 272.3 / 165.8	167.6 / 198.3 / 71.1
Total	1866.5 / 2062.2 / 1362.2	1524.3 / 1772.3 / 1065.1

CAPÍTULO 5

Discusión de Resultados

5.1 Discusión de resultados

De acuerdo con los resultados obtenidos, la circulación natural de aire entre el muro Trombe y la habitación permite reducir la demanda de calefacción de la habitación en 18,3%, 14% y 21,8% para las ciudades de Temuco, Osorno y Coyhaique, respectivamente (considerando el periodo de estudio otoño – invierno). Además, se obtiene un aumento de temperatura promedio mensual al interior de la habitación de 3,9°C para Coyhaique, 3°C para Temuco y 2,8°C para Osorno. La Tabla 21 presenta un resumen de las temperaturas promedios mensuales para cada localidad. Los resultados de aumento de temperatura interior corresponden a una condición sin sistema de calefacción.

TABLA 21. Temperatura interior, °C.

Mes	Temperatura / Ciudad		
	Temperatura ambiente	Temperatura interior sin muro Trombe	Temperatura interior con muro Trombe
	Temuco/Osorno/Coyhaique	Temuco/Osorno/Coyhaique	Temuco/Osorno/Coyhaique
Marzo	14.2 / 13.0 / 15.0	15.6 / 14.1 / 16.2	20.9 / 19.2 / 23.6
Abril	10.9 / 10.0 / 11.5	11.8 / 11.2 / 11.9	15.4 / 14.4 / 17.0
Mayo	9.2 / 8.0 / 7.9	9.7 / 8.8 / 7.9	11.9 / 11.0 / 10.6
Junio	7.9 / 7.0 / 5.6	8.5 / 7.3 / 6.1	10.1 / 8.9 / 8.1
Julio	7.1 / 6.0 / 4.4	7.7 / 6.8 / 5.4	9.7 / 8.6 / 7.7
Agosto	8.2 / 7.0 / 6.3	9.2 / 8.3 / 7.4	11.9 / 10.8 / 11.1
Septiembre	8.9 / 8.0 / 8.1	10.5 / 9.6 / 10.0	14.2 / 13.2 / 16.3
Promedio	9.4 / 8.4 / 8.4	10.4 / 9.4 / 9.3	13.4 / 12.3 / 13.5

El aumento de temperatura interior reduce la demanda de calefacción y las emisiones de MP_{2.5}. La Figura 14 resume el ahorro en demanda de calefacción en cada ciudad (de forma porcentual) para el mejor caso de estudio.

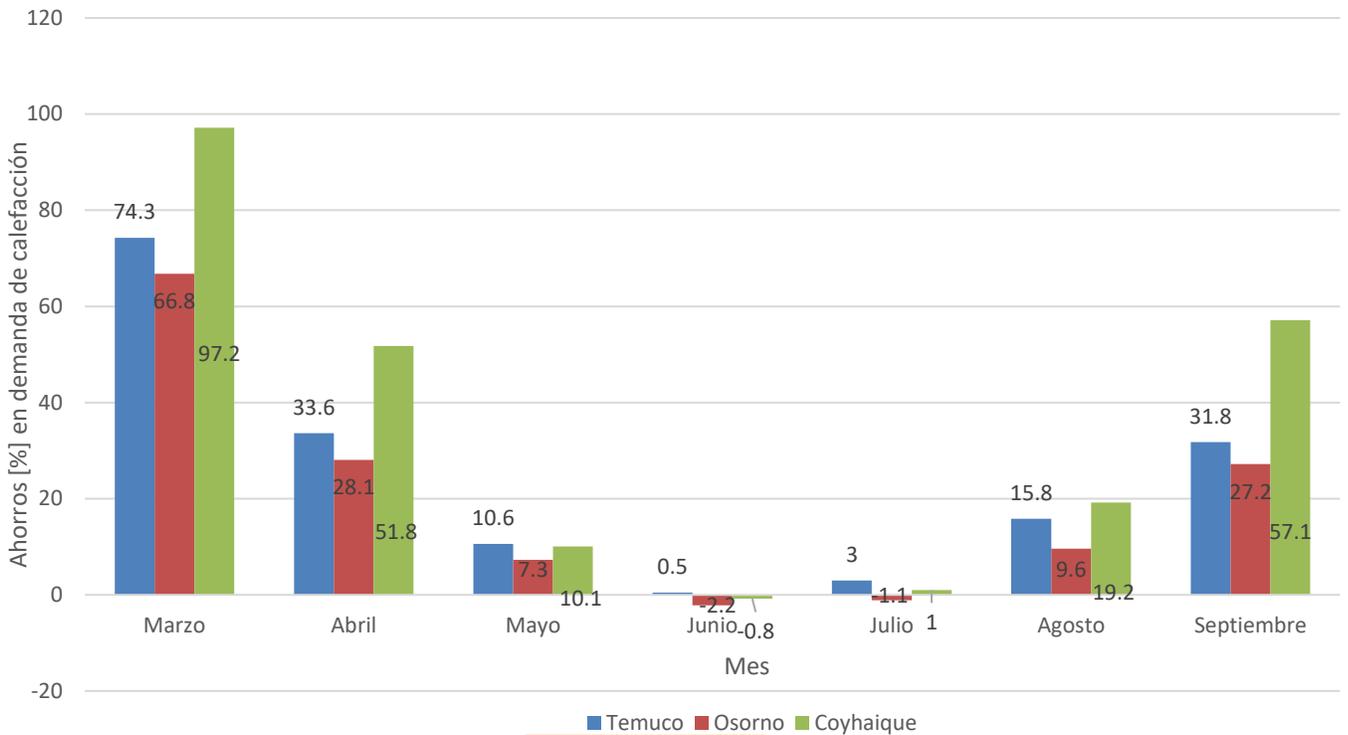


FIGURA 14. Ahorros [%] en demanda de calefacción.

De acuerdo a la Figura 14, los mayores ahorros de demanda de calefacción se obtienen en temporada media: marzo, abril y septiembre. En mayo y agosto se obtiene un ahorro moderado, y en junio y julio el ahorro es despreciable. Para Osorno la demanda de calefacción aumenta sobre el caso base. En este caso, las pérdidas convectivas y radiativas de la pared del muro Trombe aumentan durante estos meses. La Figura 15 presenta la demanda diaria de calefacción para una habitación sin muro Trombe, con muro Trombe y las pérdidas del muro Trombe para el 01 de Junio. En base a esto, se observa que durante la noche se requiere más energía debido a las mayores pérdidas por convección y radiación.

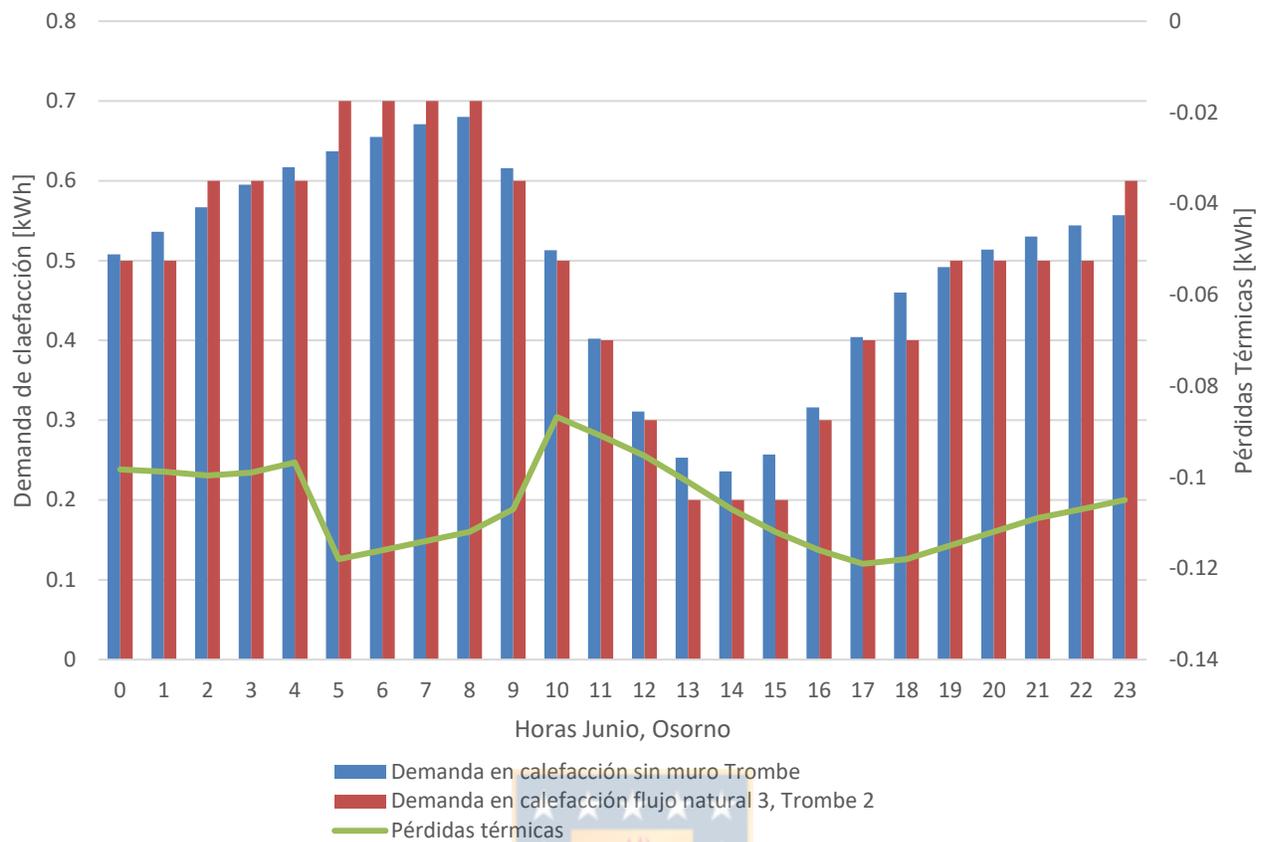


FIGURA 15. Comparación entre la demanda de calefacción y las pérdidas térmicas del muro Trombe para Osorno.

El ahorro de emisiones de $MP_{2.5}$ para el período de calefacción es de 18.3%, 14.1% y 21.8% para Temuco, Osorno y Coyhaique, respectivamente. Esto se visualiza en la Tabla 22 en donde se compara el caso base sin muro Trombe y el mejor caso: *Trombe 2* para un flujo natural 3.

TABLA 22. Emisiones MP2.5 para el caso base y el mejor caso de estudio.

Mes	Caso/Ciudad	
	Base case without Trombe wall	Best case: Trombe 2, Natural flow 3
	Temuco/Osorno/Coyhaique	Temuco/Osorno/Coyhaique
Marzo	133.2 / 186 / 75.7	34.8 / 61.9 / 2.1
Abril	221.2 / 274 / 159.3	146.9 / 197 / 76.8
Mayo	287.6 / 371.1 / 262.2	257.2 / 344.1 / 235.7
Junio	316.7 / 416.3 / 299.1	315 / 425.2 / 303.2
Julio	356.5 / 450.1 / 325.4	345.8 / 454.9 / 322.2
Agosto	305.3 / 390.8 / 274	257.1 / 353.4 / 221.4
Septiembre	245.8 / 217.7 / 193.4	167.6 / 231.4 / 83
Total	1866.5 / 2505.9 / 1589.2	1524.3 / 2067.1 / 1242.6

Otro análisis interesante de este estudio corresponde a la evaluación del efecto de la capacitancia del muro Trombe sobre el comportamiento del sistema. La Figura 16 presenta los resultados obtenidos para la localidad de Osorno, para una condición de flujo forzado de 30kg/h. Se observa que los elementos de mayor capacitancia son los que generan mayores ahorros en demanda de calefacción.

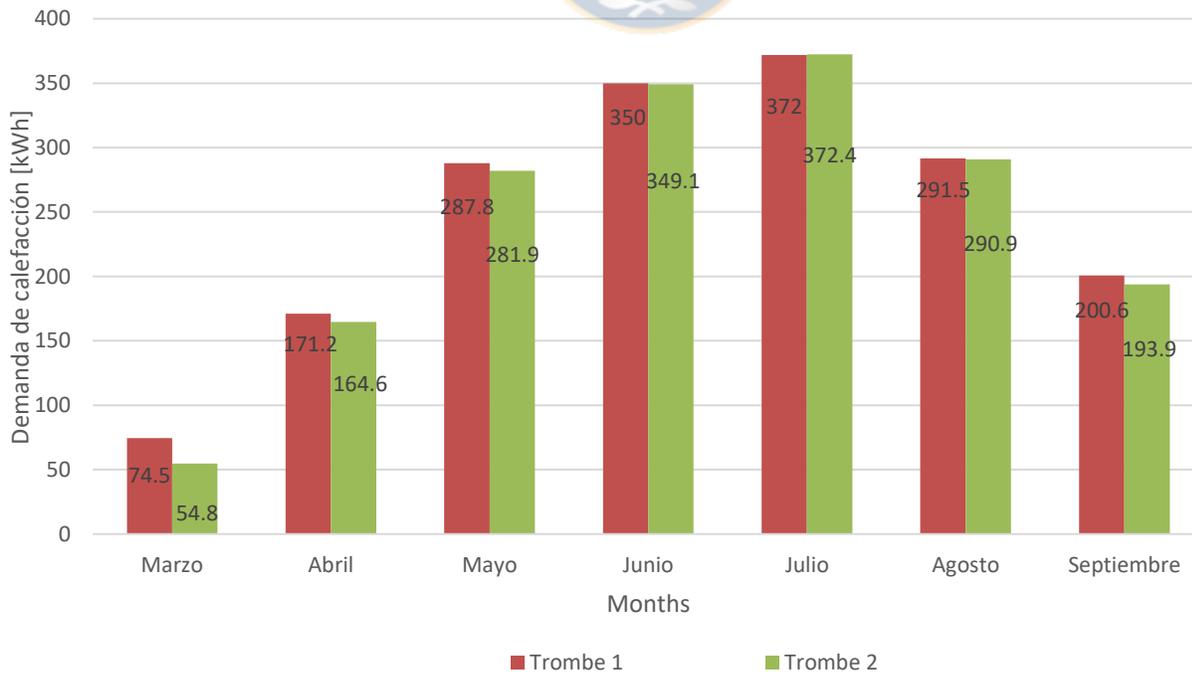


FIGURA 16. Demanda de calefacción para diferentes elementos de masa térmica para una circulación forzada de 30 kg/h en Osorno.

El mismo análisis se desarrolla para el caso de circulación natural para los casos: *Trombe 1* y *Trombe 2*, ambos con *Flujo Natural 3*, para la localidad de Osorno. Los resultados se presentan en la Figura 17, en donde se observa que durante los meses de mayor radiación solar el *Trombe 2* (muro Trombe con mayor capacitancia) presenta el mejor desempeño (menor demanda de calefacción). Por el contrario, en los meses de junio y julio, el muro *Trombe 1* presenta el mejor desempeño.

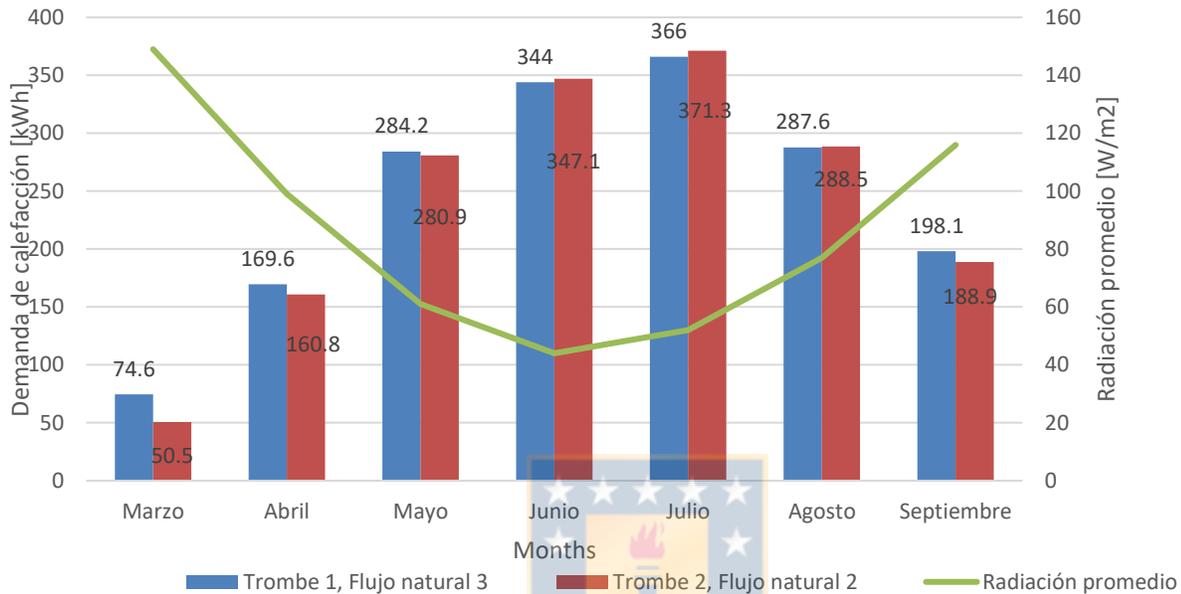


FIGURA 17. Demanda de calefacción para muros *Trombe 2* y *Trombe 3*, *Flujo natural 3* en Osorno.

CAPÍTULO 6

Conclusiones y perspectivas

Se realizó la caracterización de las habitaciones según lo establecido por la reglamentación térmica, definiendo materialidades y espesores de aislación, tanto para la zona térmica 5 y 7. Puesto que se modeló la habitación sola, es decir en ausencia de la vivienda completa, se utiliza la hipótesis que las habitaciones adyacentes tienen la misma temperatura que la habitación de simulación. **Con esto se** hace una evaluación, mediante simulación numérica, de la demanda de calefacción y emisiones de MP_{2.5} asociadas a un sistema de calefacción mayoritariamente usado en cada localidad de estudio en conjunto con la implementación de un muro Trombe.

Las simulaciones numéricas del comportamiento de la habitación se realizan mediante el software TRNSYS. Posteriormente, se incorpora al modelo de la habitación un modelo de muro Trombe de distintas configuraciones (*Trombe 1 y Trombe 2*) y transferencias de flujo de aire (circulación natural y forzada).

Según los resultados obtenidos de esta investigación, la condición de circulación natural es mucho más favorable que la condición de circulación forzada, específicamente la tercera condición (*Flujo natural 3*). Esta puede generar ahorros de demanda de calefacción del orden de 18.3%, 14% y 21.8%, para las localidades de Temuco, Osorno y Coyhaique, respectivamente. Los mismos ahorros se obtienen para las emisiones de MP_{2.5}. Asimismo, en estas condiciones la temperatura promedio de la habitación aumenta en 3°C, 2.8°C y 3.9°C en Temuco, Osorno y Coyhaique, respectivamente.

En relación con el efecto de la capacitancia del muro Trombe, se obtiene que el muro con mayor capacitancia, es decir, el con agua en tuberías de PVC, logra reducir más la demanda de calefacción de la habitación de estudio. Sin embargo, se encontró que en los meses más cálidos del período de estudio (Marzo – Mayo, Septiembre), los elementos con mayor capacitancia específica generan una menor demanda de calefacción. Por otro lado, en los meses de menor radiación solar y menor temperatura ambiente (Junio - Julio), el muro Trombe con mayor capacitancia específica genera una mayor demanda de calefacción en comparación con los otros elementos de menor capacitancia específica. Esto se debe a que un elemento con una alta capacitancia específica requiere mucha más energía

Para futuras investigaciones se sugiere optimizar el diseño del muro Trombe para generar utilidades en todos los meses. Además, se sugiere estudiar una vivienda completa y analizar la influencia del muro Trombe en ella. Junto con esto, realizar un estudio de reducción de emisiones de material particulado (MP) y realizar una comparación con los límites de MP establecidos en el Decreto 39.

Referencias

- [1]: Taagepera, R. (2013). A world population growth model: Interaction with Earth's carrying capacity and technology in limited space. *Technol Forecast Soc-Change*. 82, 34-41
- [2]: Silva de Amorim, W., Blasi, I., Pereira, J., Guazzelli, V., Krauser, G., Magtoto, M., Osório, J. (2018). The nexus between water, energy and food in the context of the global risk: An analysis of the interactions between food, water and energy security. *Environ. Impact Asses*. 72, 1-11
- [3]: Red Global de la Huella Ecológica – Global Footprint Network (2003). <https://www.footprintnetwork.org/>
- [4]: Boso, A., Oltra, C., Hofflinger, A. (2019). Participation in a programme for assisted replacement of wood-burning stoves in Chile: The role of sociodemographic factors, evaluation of air quality and risk perception. *Energy Policy*. 129, 1220-1226.
- [5]: Mardones, C., Cornejo, N., 2020. Ex-post evaluation of environmental decontamination plans on air quality in Chilean cities. *J. Environ. Manage*. 256, 109929.
- [6]: Ministerio del medio ambiente (2018). Guía de calidad de aire y educación Ambiental; Ministerio medio Ambiente; <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/08/Guia-para-Docentes-Sobre-Calidad-del-Aire-003.pdf>.
- [7]: Perez, P., Menares, C., Ramírez, C. 2020. PM2.5 forecasting in Coyhaique, the most polluted city in the Americas; *Urban Clim*. 32, 100608.
- [8]: Red de la Pobreza energética – Energy poverty network; <http://redesvid.uchile.cl/pobreza-energetica/wp-content/uploads/2019/05/DT.-ACCESO-EQUITATIVO-A-ENERGIA-DE-CALIDAD-EN-CHILE.-PROPUESTA-INDICADOR-1-1.pdf>; ISBN: 978-956-398-826-0.
- [9]: Agurto, L., Allacker, K., Fissore, A., Agurto, C., De Troyer, F., 2020. Design and experimental study of a low-cost prefab Trombe wall to improve indoor temperatures in social housing in the Biobío region in Chile. *Sol Energy*. 198, 704-721.
- [10]: Hu, Z., Zhang, S., Hou, J., He, W., Liu, X., Yu, C., Zhu, J., 2020. An experimental and numerical analysis of novel water blind-Trombe wall system. *Energy Convers. Manag*. 205, 112380.
- [11]: Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero; https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/2_Volume2/V2_1_Ch1_Introduction.pdf
- [12]: Instituto de Políticas Públicas de Salud – Institute of public health policies; <http://www.ipsuss.cl/ipsuss/analisis-y-estudios/11-300-muertes-por-contaminacion-se-producen-en-chile-cada-ano/2016-03-22/151633.html>
- [13]: Randelovic, D., Vasov, M., Ignjatovic, M., Bogdanoic, I., Kostić, D., 2018. Impact of Trombe Wall Construction on Thermal Comfort and Building Energy Consumption. *Facta Universitatis*. 16, 279-292.
- [14]: Liu, Y., Wang, D., Ma, C., Liu, J., 2013. A numerical and experimental analysis of the air vent management and heat storage characteristics of a trombe wall. *Sol Energy*. 91, 1-10.
- [15]: Q. Ma, H. Fukudab, M. Lee, T. Kobatake, Y. Kuma, A. Ozakif; Study of the utilization of heat in the mechanically ventilated Trombe wall in a house with a central air conditioning and air circulation system, *Appl. Energy* 222 (2018).

- [16]: M Rabani, V. Kalantar; *Heat transfer analysis of a Trombe wall with a projecting channel design*, *Energy* 134 (2017).
- [17]: J. Jie, Y. Hua, H. Wei, P. Gang, L. Jianping, J. Bin; *Modeling of a novel Trombe wall with PV cells*; *Build. Environ* 42 (2007).
- [18]: Agurto, C., 2017. *Informe de Memoria de Título; Análisis teórico experimental de un muro Trombe adosado a una vivienda en clima costero y del valle central de la región del Biobío.*
- [19]: Revista EMB Construcción, Reglamentación térmica; [http://www.emb.cl/construccion/articulo.mvc?xid=3698&ni=la-reglamentacion-termica-una-mirada-desde-su-entrada-en-vigilancia#:~:text=La%20Reglamentaci%C3%B3n%20T%C3%A9rmica%20\(RT\)%20establece,Urbano%20y%20Construcciones%20\(OGUC\).&text=Las%20expectativas%20eran%20altas%2C%20en,de%20las%20viviendas%20en%20Chile](http://www.emb.cl/construccion/articulo.mvc?xid=3698&ni=la-reglamentacion-termica-una-mirada-desde-su-entrada-en-vigilancia#:~:text=La%20Reglamentaci%C3%B3n%20T%C3%A9rmica%20(RT)%20establece,Urbano%20y%20Construcciones%20(OGUC).&text=Las%20expectativas%20eran%20altas%2C%20en,de%20las%20viviendas%20en%20Chile).
- [20]: Jaber, S., Ajib, S., 2011. *Optimum design of Trombe wall system in mediterranean region*. *Solar energy*. 85, 1891-1898.
- [21]: Shen, J., Lassue S., Zalewski, L., Huang, D., 2007. *Numerical study of classical and composite solar walls by Trnsys*. *Energy and building*. 39, 962-974.
- [22]: Center for Climate and Resilience Research; <http://www.cr2.cl>.
- [23]: Díaz, L., Carimán, E., Moncada, J., Abril 2013; *Estudio de consumo y caracterización del uso de la leña en la ciudad de Osorno; Unidad de calidad del aire Facultad de Ingeniería, Universidad católica de Temuco.*
- [24]: Ministerio del Medio Ambiente (2019). *Establece Plan de Descontaminación Atmosférica para la Ciudad de Coyhaique y su zona Circundante; Julio 2019; URL: <https://www.leychile.cl/N?i=1133992&f=2019-07-17&p=>*
- [25]: Ministerio del Medio Ambiente (2015); *Establece Plan de Descontaminación Atmosférica por MP2.5 Para las comunas de Temuco y Padre las Casas Actualización del Plan de Descontaminación por MP10, para las mismas comunas. <https://www.leychile.cl/N?i=1084085&f=2015-11-17&p=>*
- [26]: Ministerio de Energía (2018). *Informe final de usos de la energía de los hogares Chile 2018.*
- [27]: Avendaño, N. (2019). *Caracterización de las principales fuentes emisoras de contaminantes atmosféricos de la comuna de San Carlos y propuesta preliminar de medidas de gestión de la calidad del aire; Universidad de Concepción, Concepción.*
- [28]: GreenLabUC (2016). *Manual para Desarrollo de inventarios, Estudio solicitado por la subsecretaría del medio ambiente. <https://www.greenlab.uc.cl/wp-content/uploads/2017/02/MANIN-Manual.pdf>*
- [29]: Ministerio del Medio Ambiente; *Decreto 12: Establece Norma Primaria de Calidad Ambiental para Material Particulado Fino Respirable MP 2.5; 2011.*
- [30]: *Thermal Earth; Frequently asked questions; Biomass boiler – Moisture content of Wood; <https://www.thermalearth.co.uk/blog/37>*
- [31]: Programa de cálculo O3.-PBSD-Datos de Equipos y Resultados-v2.2; 2019; <https://www.calificacionenergetica.cl/herramientas-de-calculo-de-la-calificacion-energetica-de-viviendas/>
- [32]: Manual de Usuario Calefactores a Leña Bosca (2020). *Especificaciones técnicas. <https://www.coopelancomercial.cl/admin/archivos/productos//1585460138.pdf>*

- [33]: Catalogo cocinas tradicionales; Amesti; <https://www.amesti.cl/cocinas-tradicionales/235-cocina-a-lena-amorossa-blanca-amesti.html>
- [34]: Lunguleasa, A., Spirchez, C., Zeleniu, O., 2020. Evaluation of the calorific values of wastes from some tropical Wood species; Maderas, Cienc. Tecnol. 22 no3.
- [35]: Plataforma Urbana, Medio Ambiente; <https://www.plataformaurbana.cl/archive/2016/10/04/este-mapa-de-la-oms-muestra-la-contaminacion-en-3-000-ciudades/>; 4 Octubre 2016.
- [36] Briga, A., Martins, A., Boaventura, J., Lanzinha, J., Paiva, A., 2017. An analytical approach to assess the influence of the massive wall material, thickness and ventilation system on the Trombe wall thermal performance. J Build Phys. 41, 445-468.
- [37]: Mathematical Reference, TRNSYS 16, <http://web.mit.edu/parmstr/Public/Documentation/05-MathematicalReference.pdf>.
- [38]: TRNSYS: Transient System Simulation Tool; <https://www.trnsys.com/>
- [39]: Nowzari, R., Atikol, U., 2009. Transient performance análisis of a model building integrated with a trombe-wall. Engineering and Environment (THE'09), 20-22



ANEXO A

A.1 Resultados gráficos circulación forzada.

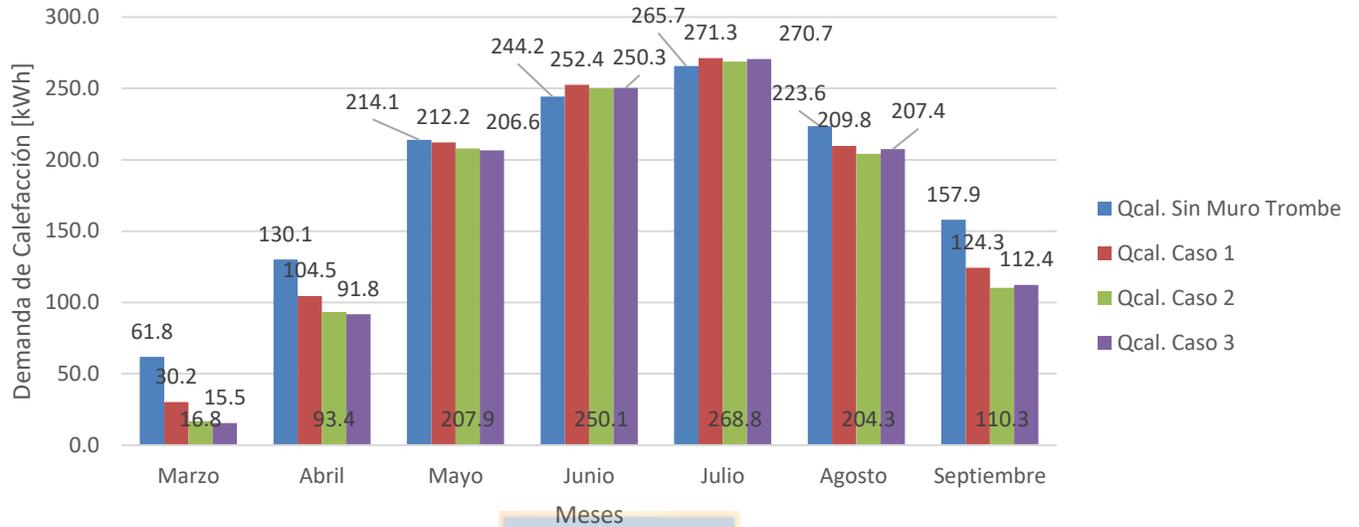


Figura A-1. Demanda de calefacción total, zona interior, localidad de Coyhaique, 0 kg/h.

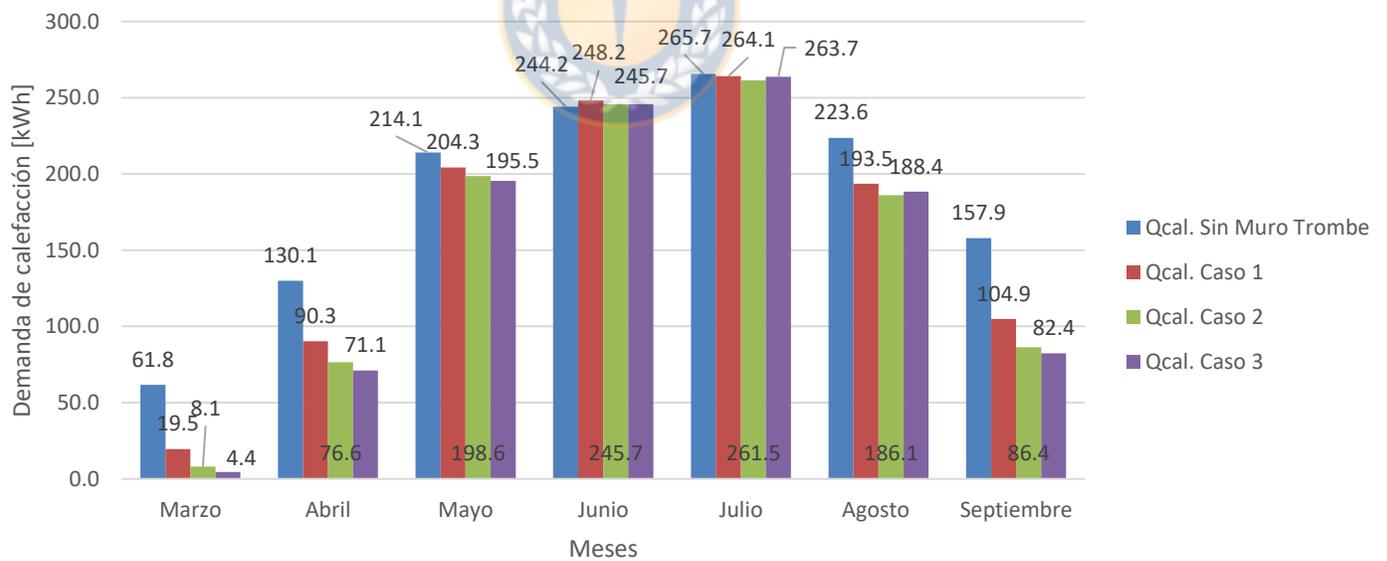


Figura A-2. Demanda de calefacción total, zona interior, localidad de Coyhaique, 10 kg/h.

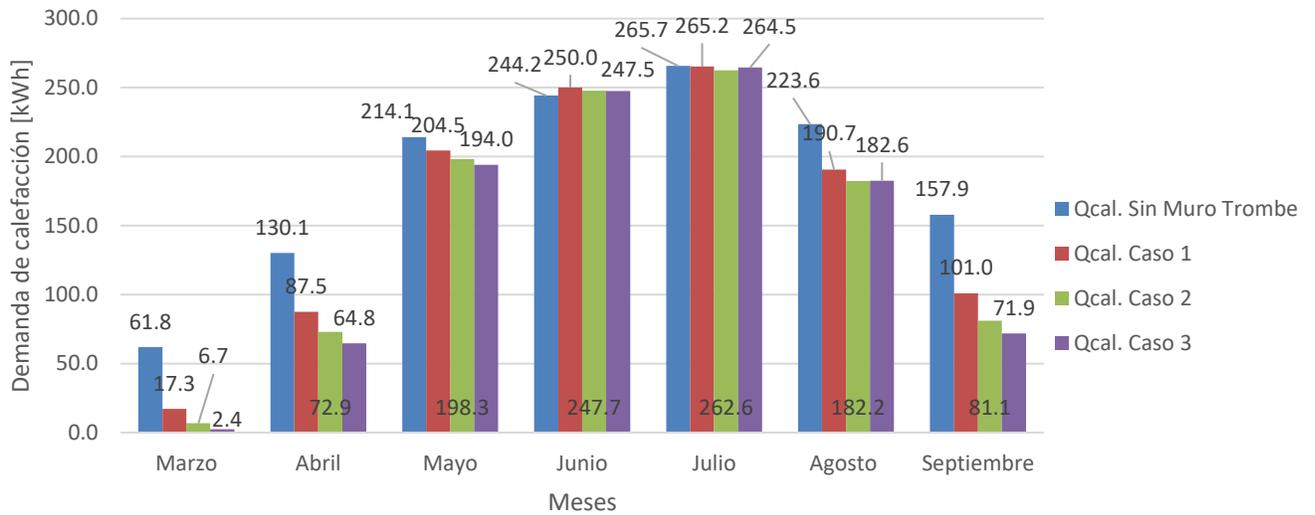


Figura A-3. Demanda de calefacción total, zona interior, localidad Coyhaique, 30 kg/h.

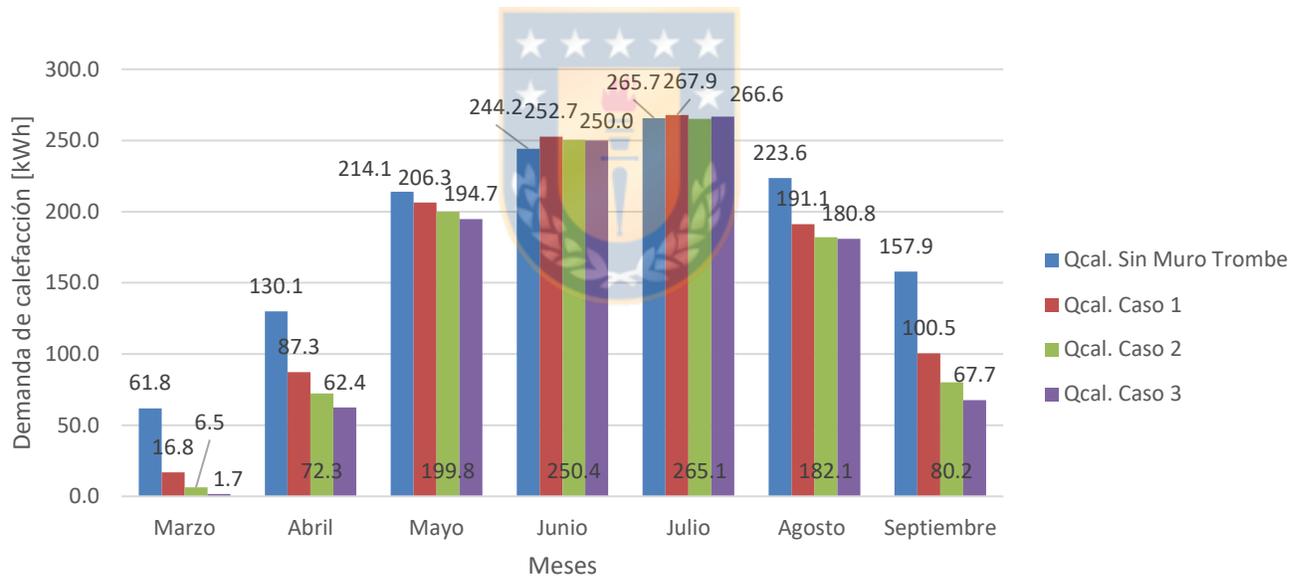


Figura A-4. Demanda de calefacción total, zona interior, localidad Coyhaique, 60 kg/h.

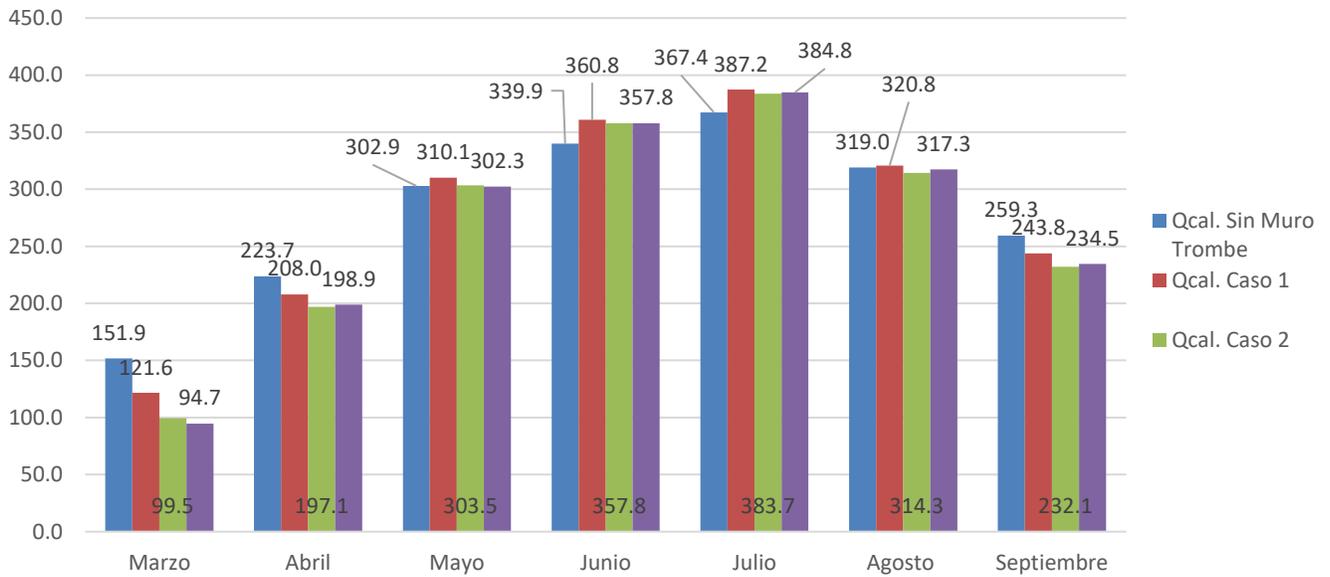


Figura A-5. Demanda de calefacción total, zona interior, localidad de Osorno, o kg/h.

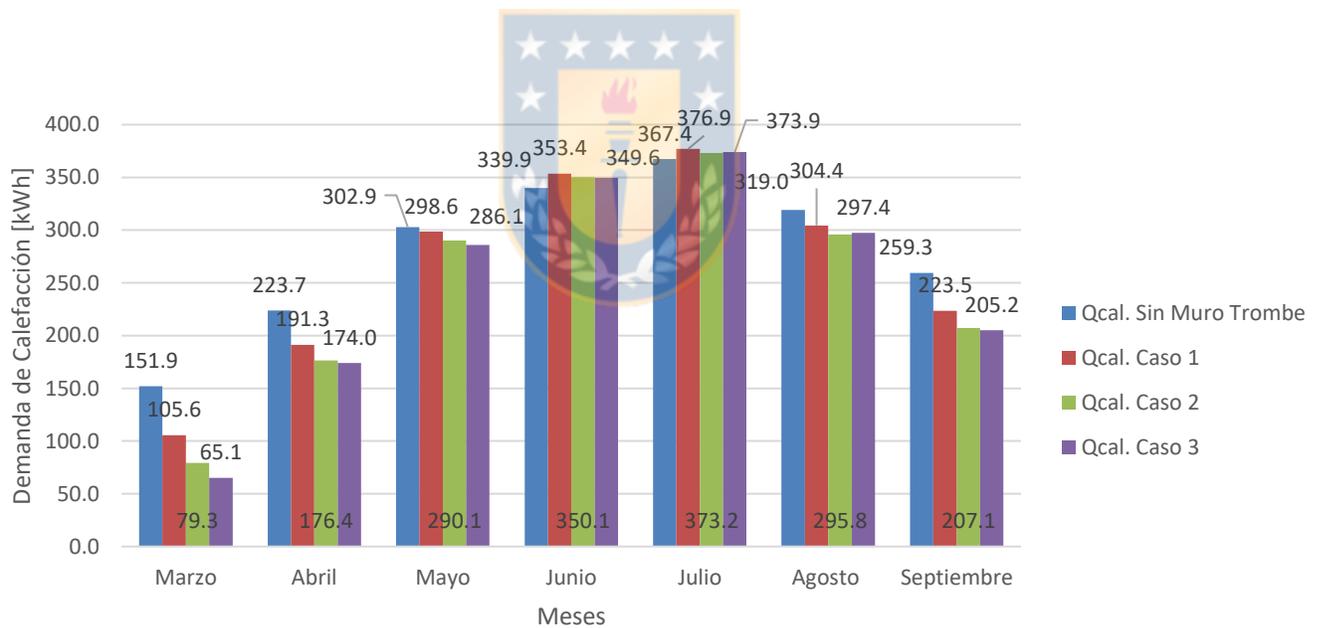


Figura A-6. Demanda de calefacción total, zona interior, localidad de Osorno, 10 kg/h.

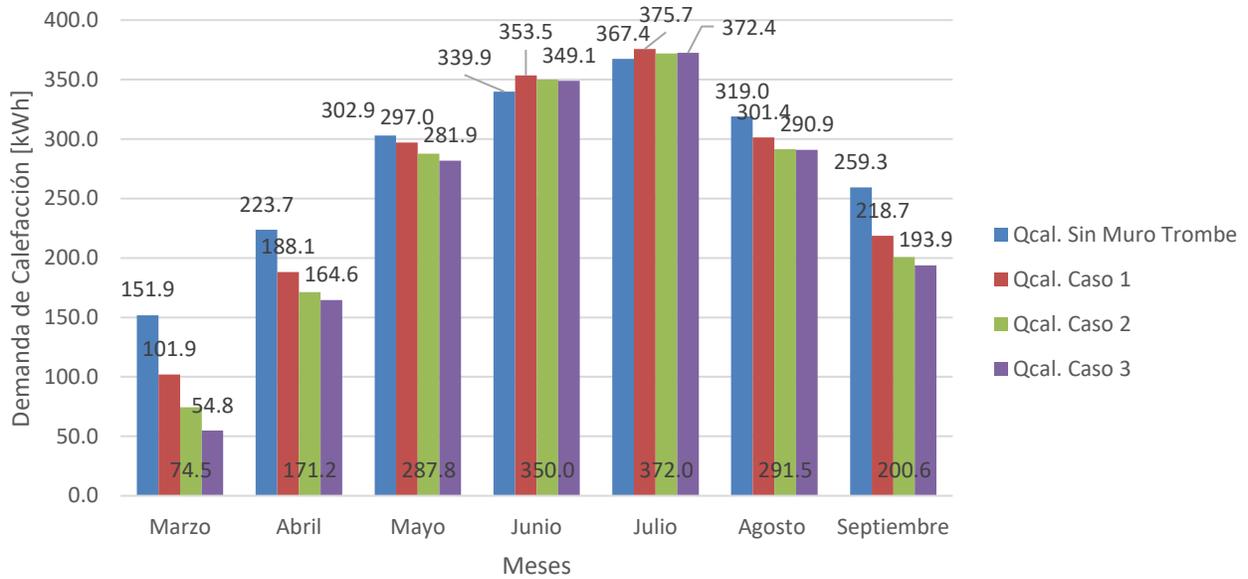


Figura A-7. Demanda de calefacción total, zona interior, localidad de Osorno, 30 kg/h.

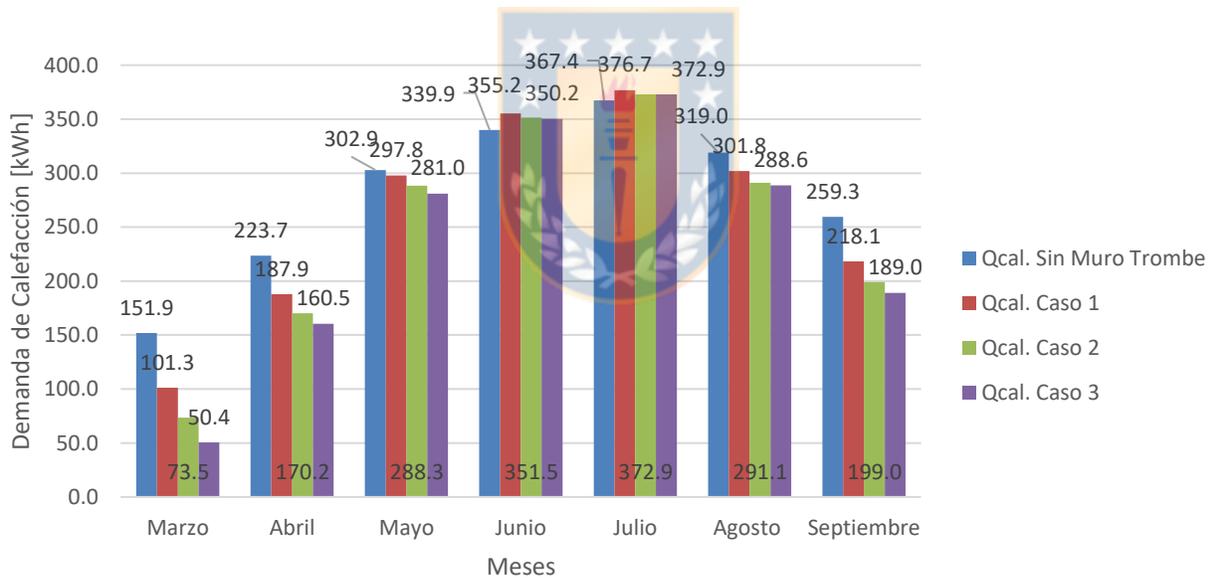


Figura A-8. Demanda de calefacción total, zona interior, localidad de Osorno, 60 kg/h.

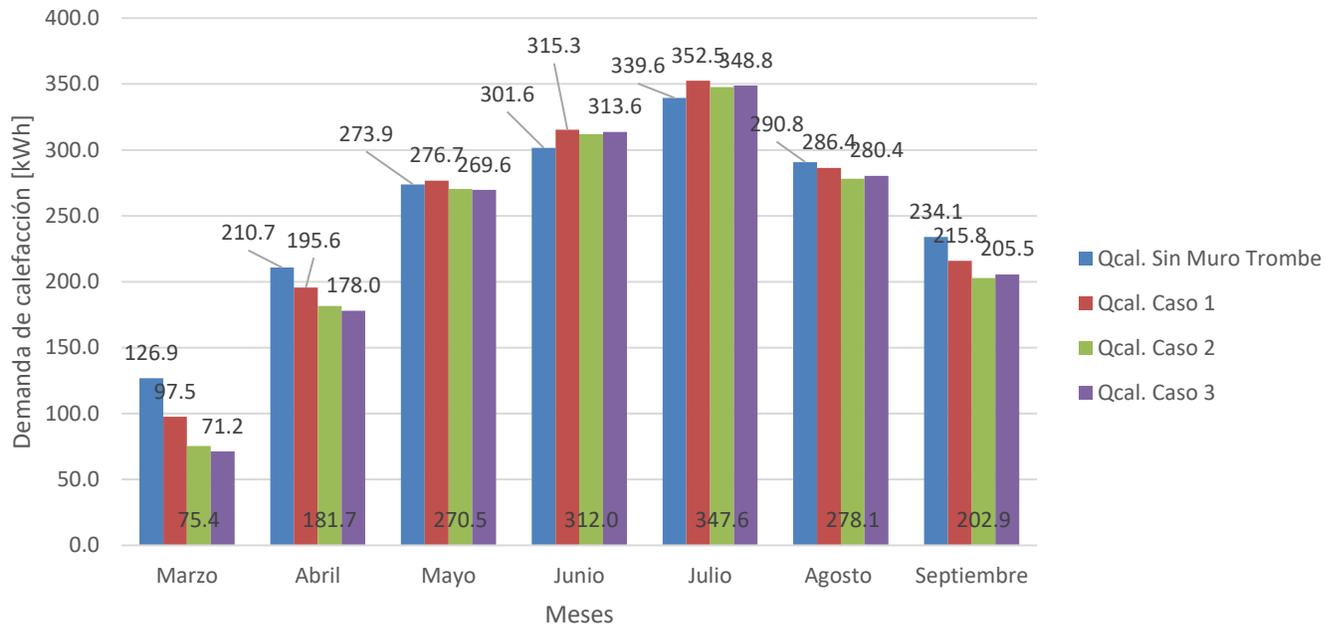


Figura A-9. Demanda de calefacción total, zona interior, localidad de Temuco, okg/h.

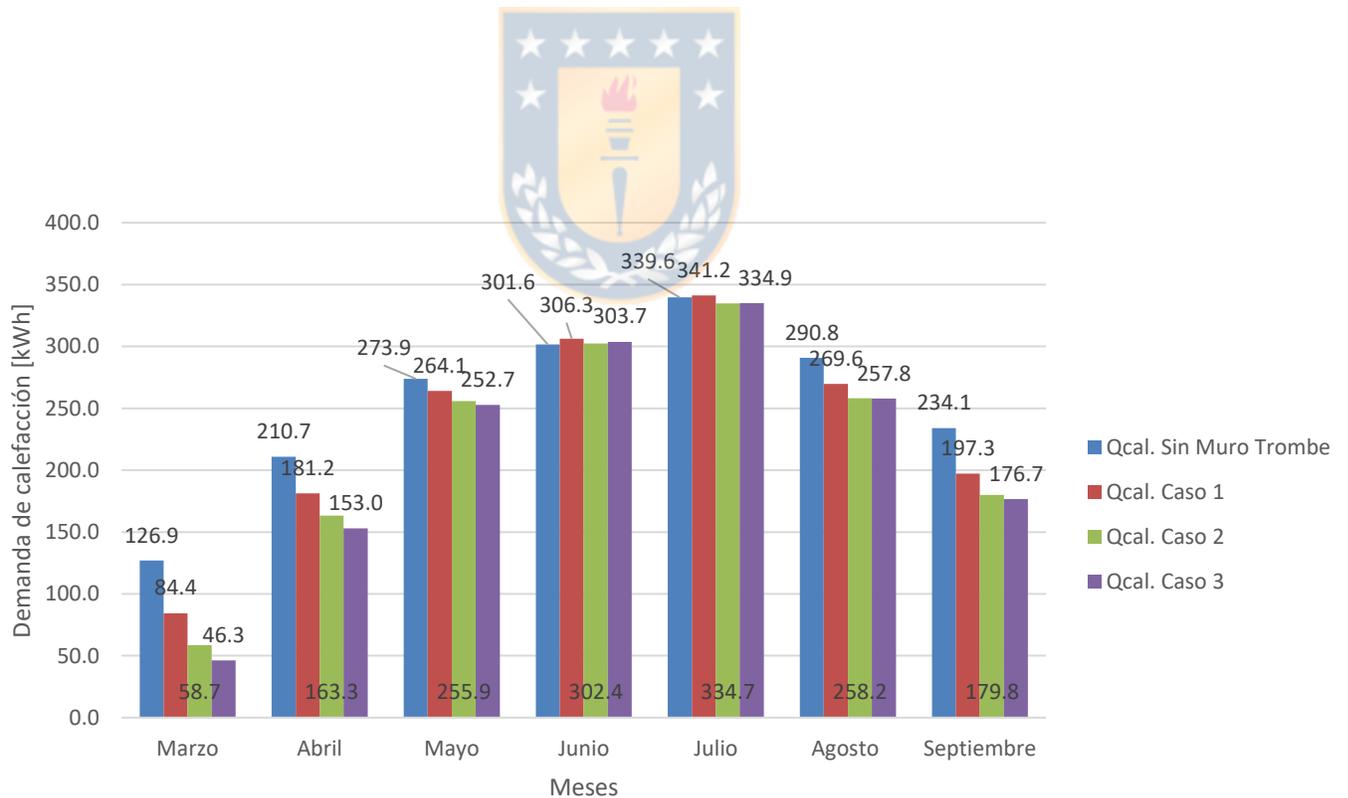


Figura A-10. Demanda de calefacción total, zona interior, localidad de Temuco, 10 kg/h.

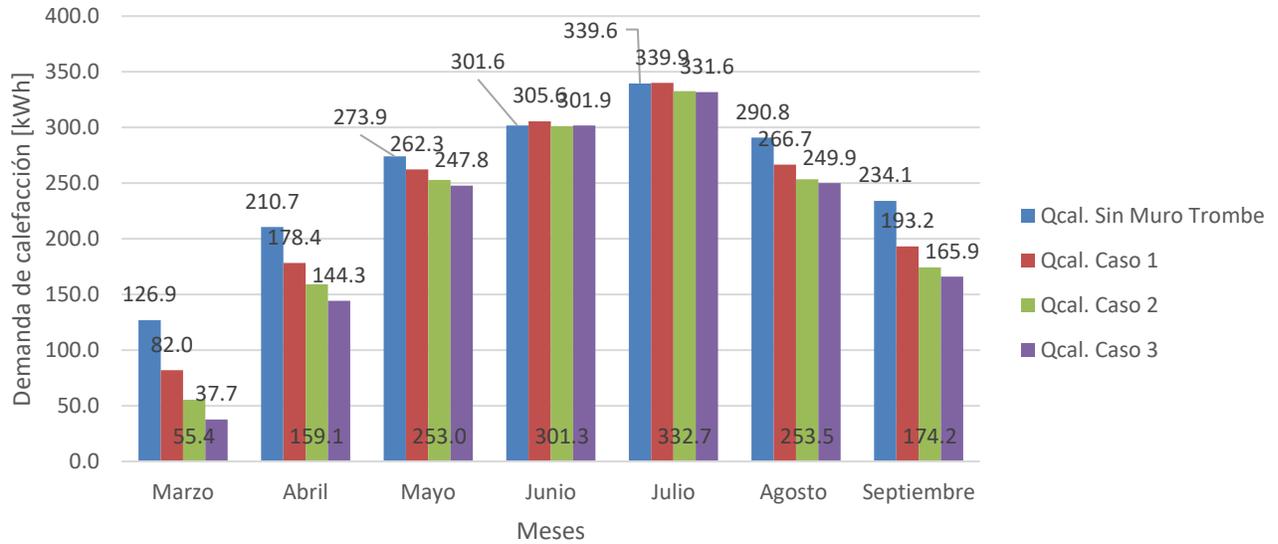


Figura A-11. Demanda de calefacción total, zona interior, localidad de Temuco, 30 kg/h.

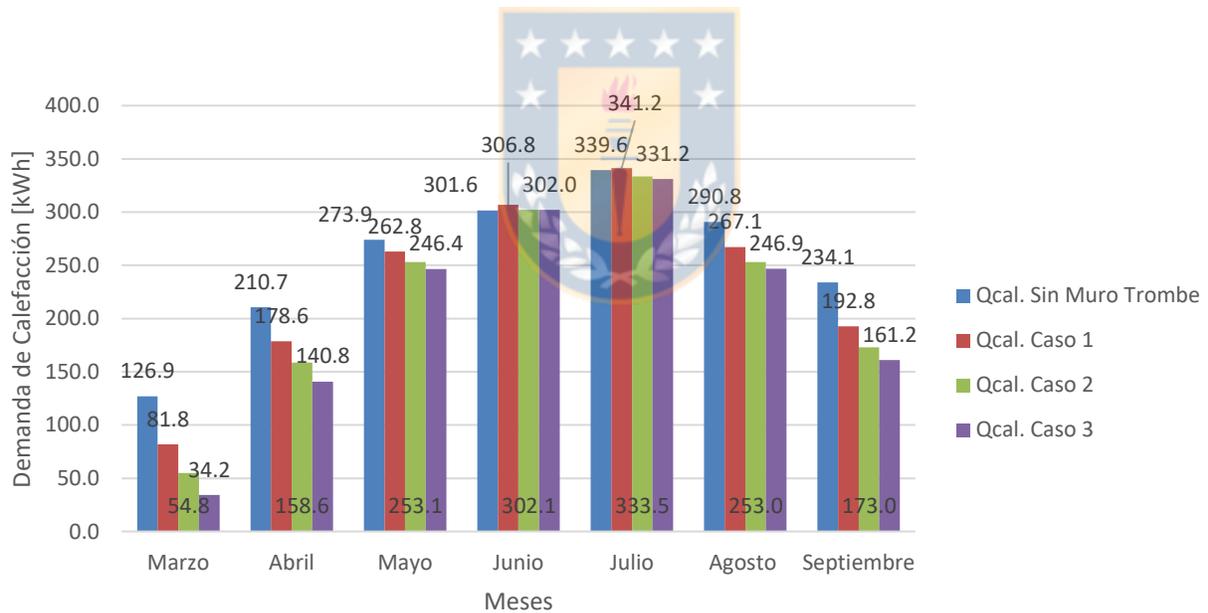


Figura A-12. Demanda de calefacción total, zona interior, localidad de Temuco, 60 kg/h.