



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



**ANÁLISIS TÉCNICO Y AMBIENTAL DE LA UTILIZACIÓN DE ENVOLVENTE
VEGETAL EN EDIFICIOS**

POR

Paola Francisca Jiménez Ruiz

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título de Ingeniero Civil

Profesor Guía
Mauricio Pradena

Septiembre 2022
Concepción (Chile)

© 2022 Paola Francisca Jiménez Ruiz

© 2022 Paola Francisca Jiménez Ruiz

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

RESUMEN

En Chile, existe un alto consumo de energía asociado a la operación de los edificios, el cual aumenta cerca de 1 % cada año, junto con el aumento de 2 % de las emisiones de CO₂ en el sector de edificación. Debido a los compromisos del país contra el cambio climático, es necesario revertir esta tendencia. Una solución asociada a la eficiencia energética es la utilización de envolventes vegetales, las cuales además tienen beneficios en el ambiente edificado y en el bienestar de las personas.

El objetivo de este trabajo es analizar técnica y ambientalmente la utilización de envolvente vegetal en edificios bajo condiciones climáticas chilenas. Para esto, se realizó una simulación dinámica para determinar las demandas energo-térmicas de un edificio residencial y uno de oficinas, ubicados en cuatro ciudades chilenas, con y sin envolvente vegetal. Se determinaron aspectos técnicos, costo de implementación y operación de los sistemas de envolvente vegetal. Por último, se determinaron los impactos en el capital natural, capital humano y social, y capital manufacturado y financiero.

En la mayoría de los casos se obtuvieron cambios contraproducentes, al resultar que aumentaba la demanda de energía anual al simular la envolvente vegetal, siendo casi el único caso favorable el edificio residencial ubicado en Santiago con una disminución de 2.34 % de la demanda de energía anual. De esta forma, el uso de envolvente vegetal en edificios no siempre puede asegurar un beneficio de ahorro energético. Al determinar los impactos en los tres capitales, se identificaron como positivos principalmente los beneficios medioambientales y sociales, y como negativos los altos costos de inversión y mantenimiento de los sistemas de envolvente vegetal. Los principales beneficios medioambientales y sociales asociados al uso de envolvente vegetal en edificios son la reducción del efecto isla de calor urbana, mejoramiento de la calidad del aire y mejoramiento de la gestión de aguas lluvias, los cuales son importantes para el mejoramiento de la vida urbana presente y futura.

ABSTRACT

In Chile, there is a high energy consumption associated with the operation of buildings, which increases about 1% each year, together with the 2% increase in CO₂ emissions in the building sector. Due to the country's commitments against climate change, it is necessary to reverse this trend. A solution associated with energy efficiency is the use of green envelopes, which also have benefits for the built environment and for people's well-being.

The objective of this work is to analyze technically and environmentally the use of vegetal envelope in buildings under Chilean climatic conditions. For this, a dynamic simulation was carried out to determine the thermal energy demands of a residential building and an office building, located in four Chilean cities, with and without green envelope. Technical aspects, cost of implementation and operation of the green envelope systems were determined. Finally, the impacts on natural capital, human and social capital, and manufactured and financial capital were determined.

In most cases, counterproductive changes will be acquired, as it turned out that the annual energy demand increased when simulating the green envelope, with almost the only favorable case being the residential building located in Santiago with a decrease of 2.34% of the annual energy demand. In this way, the use of green envelope in buildings cannot always ensure an energy saving benefit. When determining the impacts on the three capitals, mainly the environmental and social benefits were identified as positive, and the high investment and maintenance costs of the plant cover systems as negative. The main environmental and social benefits associated with the use of green envelopes in buildings are the reduction of the urban heat island effect, improvement of air quality and improvement of rainwater management, which are important for the improvement of urban life. present and future.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 MOTIVACIÓN	1
1.2 OBJETIVO GENERAL.....	1
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.4 METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	2
1.5 ALCANCES.....	2
1.6 PRINCIPALES RESULTADOS Y CONCLUSIONES	3
1.7 ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA	4
CAPÍTULO 2 ENVOLVENTE VEGETAL EN EDIFICIOS	5
2.1 INTRODUCCIÓN.....	5
2.2 PROBLEMÁTICA.....	5
2.3 TIPOS DE ENVOLVENTE VEGETAL	5
2.4 PRINCIPALES BENEFICIOS ASOCIADOS A LA ENVOLVENTE VEGETAL	6
2.5 ESTUDIOS INTERNACIONALES SOBRE CONSUMO ENERGÉTICO EN EDIFICIOS CON ENVOLVENTE VEGETAL	7
2.6 ESTUDIOS NACIONALES SOBRE CONSUMO ENERGÉTICO EN EDIFICIOS CON ENVOLVENTE VEGETAL.....	9
2.7 CONCLUSIÓN	10
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA	11
3.1 INTRODUCCIÓN.....	11
3.2 MÉTODO PARA SIMULACIÓN DEL DESEMPEÑO ENERGI-TÉRMICO	11
3.2.1 <i>Configuración de casos</i>	11
3.2.2 <i>Definición de modelo de edificio</i>	11
3.2.3 <i>Datos de entrada para simulación</i>	13
3.2.4 <i>Definición de envolvente vegetal</i>	14
3.2.5 <i>Software para simulación</i>	15
3.2.6 <i>Comparativas de resultados</i>	16
3.3 DETERMINACIÓN DE ASPECTOS TÉCNICOS Y ECONÓMICOS DE ENVOLVENTES VEGETALES	16
3.4 DETERMINACIÓN DE IMPACTOS EN LOS TRES CAPITALES	17
3.5 CONCLUSIÓN	17
CAPÍTULO 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	18
4.1 INTRODUCCIÓN.....	18
4.2 RESULTADOS SIMULACIÓN ENERGI-TÉRMICA	18
4.2.1 <i>Edificio residencial</i>	19

4.2.2	<i>Edificio de oficinas</i>	24
4.3	ASPECTOS TÉCNICOS DE LA ENVOLVENTE VEGETAL	29
4.3.1	<i>Selección de plantas</i>	29
4.3.2	<i>Sistemas constructivos</i>	30
4.3.3	<i>Riego</i>	32
4.3.4	<i>Interacción de la envolvente vegetal con material del edificio</i>	33
4.4	ASPECTOS ECONÓMICOS DE LA ENVOLVENTE VEGETAL	34
4.4.1	<i>Costos de instalación</i>	34
4.4.2	<i>Costos de operación y mantenimiento</i>	34
4.5	INVESTIGACIÓN DE LOS HECHOS	35
4.5.1	<i>Energía</i>	35
4.5.2	<i>Medio Ambiente</i>	35
4.5.3	<i>Economía</i>	40
4.5.4	<i>Regulación legal</i>	40
4.5.5	<i>Sociedad</i>	41
4.6	SÍNTESIS	41
4.7	CONCLUSIÓN	42
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y COMENTARIOS		44
REFERENCIAS.....		46
ANEXOS.....		51
ANEXO 1.1 CONTRIBUCIÓN A LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE.....		51
ANEXO 3.1 DATOS DE ENTRADA PARA SIMULACIÓN		52
ANEXO 3.1.1	ARCHIVOS CLIMÁTICOS	52
ANEXO 3.1.2	ZONIFICACIÓN DE RECINTOS INTERIORES DEL MODELO ENERGÉTICO	52
ANEXO 3.1.3	CARGAS INTERNAS ASOCIADAS A ILUMINACIÓN.....	52
ANEXO 3.1.4	CARGAS INTERNAS ASOCIADAS A EQUIPOS ELÉCTRICOS.....	53
ANEXO 3.1.5	CARGAS INTERNAS ASOCIADAS A OCUPANTES	53
ANEXO 3.1.6	CÁLCULO DE DEMANDA TÉRMICA	54
ANEXO 3.1.7	CONSTRUCCIONES Y MATERIALES	56
ANEXO 3.1.8	INFILTRACIONES Y VENTILACIÓN HIGIÉNICA	59
ANEXO 3.1.9	VENTILACIÓN POR MEDIO DE APERTURA DE VENTANAS O PUERTAS	60
ANEXO 3.2 PORCENTAJE DE VENTANAS POR ORIENTACIÓN		61
ANEXO 3.2.1	SUPERFICIE VIDRIADA DEL EDIFICIO RESIDENCIAL.	61
ANEXO 3.2.2	SUPERFICIE VIDRIADA DEL EDIFICIO DE OFICINAS	62

ANEXO 3.3 DEMANDA DE RIEGO63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Resultados de investigación techo verde Chile..... 10

Tabla 3.1. Ciudades elegidas y sus respectivas zonas térmicas. 11

Tabla 3.2 Alturas máximas de edificación según Plan Regulador..... 13

Tabla 3.3 Variables modificadas para techo verde. 14

Tabla 3.4 Superficie techo verde en edificios. 14

Tabla 3.5 Horario transmitancia térmica de muro verde..... 15

Tabla 4.1 Demanda energética de edificio residencial..... 21

Tabla 4.2 Cambio porcentual de demanda energética en edificio residencial. 21

Tabla 4.3 Cambio porcentual de demanda energética en edificio residencial (cont.)..... 22

Tabla 4.4 Demanda energética de edificio residencial..... 23

Tabla 4.5 Cambio porcentual de demanda energética en edificio residencial. 23

Tabla 4.6 Demanda energética de edificios de oficinas. 26

Tabla 4.7 Cambio porcentual de demanda energética en edificio de oficinas. 26

Tabla 4.8 Cambio porcentual de demanda energética en edificio de oficinas (cont.)..... 27

Tabla 4.9 Demanda energética de edificio de oficinas..... 28

Tabla 4.10 Cambio porcentual de demanda energética en edificio de oficinas. 28

Tabla 4.11 Cambio porcentual en edificio de oficinas sin horario de vacaciones. 29

Tabla 4.12 Componentes principales de muros verdes. 31

Tabla 4.13 Componentes principales de muros verdes (cont.) 32

Tabla 4.14 Demanda estimada de riego. 32

Tabla 4.15 Demanda estimada de riego (cont.)..... 33

Tabla 4.16 Costos de instalación de envolventes vegetales 34

Tabla 4.17 Costos de operación y mantenimiento de envolventes vegetales..... 34

Tabla 4.18 Costos de operación y mantenimiento de envolventes vegetales (cont.) 35

Tabla 4.19 Temperatura exterior superficie de muro..... 37

Tabla 4.20 Temperatura exterior superficie de techo..... 38

Tabla 4.21 Síntesis de Impactos en los tres capitales..... 42

Tabla A.3. 1 Horarios de encendido de luces al interior de la vivienda..... 52

Tabla A.3. 2 Horarios de encendido de luces al interior de edificio de oficinas..... 53

Tabla A.3. 3 Horarios de encendido de equipos eléctricos al interior de edificio de oficinas.	53
Tabla A.3. 4 Fracción de ocupación durante el día en la vivienda.	54
Tabla A.3. 5 Carga interna asociada a ocupantes en edificio de oficinas.	54
Tabla A.3. 6 Temperaturas mensuales para cálculo de demanda de calefacción.....	55
Tabla A.3. 7 Temperaturas mensuales para cálculo de demanda de enfriamiento.	55
Tabla A.3. 8 Valores de transmitancia térmica U [W/(m ² K)] y resistencia térmica (R100).....	56
Tabla A.3. 9 Características térmicas de los materiales.	56
Tabla A.3. 10 Solución constructiva para techo según zona térmica.....	57
Tabla A.3. 11 Resistencia y transmitancia térmicas total para techo.	57
Tabla A.3. 12 Solución constructiva para muro exterior según zona térmica.	57
Tabla A.3. 13 Resistencia y transmitancia térmica total para muro exterior.	58
Tabla A.3. 14 Solución constructiva para piso exterior según zona térmica.	58
Tabla A.3. 15 Resistencia y transmitancia térmica total para piso exterior.	58
Tabla A.3. 16 Solución constructiva para piso interior.....	58
Tabla A.3. 17 Solución constructiva para muro interior.	59
Tabla A.3. 18 Solución constructiva para puerta exterior.....	59
Tabla A.3. 19 Características térmicas de ventana de doble vidriado hermético (DVH)	59
Tabla A.3. 20 Tasas de ventilación	60
Tabla A.3. 21 Horarios de tasas de ventilación.....	60
Tabla A.3. 22 Porcentajes máximos de superficie vidriada por orientación.....	61
Tabla A.3. 23 Superficie vidriada del edificio residencial.....	61
Tabla A.3. 24 Superficie vidriada del edificio de oficinas.....	62
Tabla A.3. 25 Factores de especie, densidad y microclima por tipo de vegetación.....	63
Tabla A.3. 26 Precipitaciones y evapotranspiración por localidad.	64
Tabla A.3. 27 Eficiencia de sistema de riego	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Imagen referencial de tipos de techos verdes.	6
Figura 2.2 Imagen referencial de una fachada verde (izquierda) y pared viva (derecha).	6
Figura 2.3 Edificio Consorcio Santiago	9
Figura 3.1 Edificio residencial vista norte y poniente (izquierda), vista sur y oriente (derecha). Línea naranja indica el norte.	12
Figura 3.2 Edificio de oficinas vista norte y poniente (izquierda), vista sur y oriente (derecha). Línea naranja indica el norte.	12
Figura 4.1 Gráfico de resultados caso base residencial La Serna	19
Figura 4.2 Gráfico de resultados caso base residencial Santiago.....	19
Figura 4.3 Gráfico de resultados caso base residencial Concepción.....	20
Figura 4.4 Gráfico de resultados caso base residencial Temuco.....	20
Figura 4.5 Gráfico de resultados caso base oficinas La Serena	24
Figura 4.6 Gráfico de resultados caso base oficinas Santiago	24
Figura 4.7 Gráfico de resultados caso base oficinas Concepción	25
Figura 4.8 Gráfico de resultados caso base oficinas Temuco	25
Figura 4.9 Planta <i>Sedum spurium</i>	30
Figura 4.10 Componentes mínimos de sistema de techo verde	31
Figura 4.11 Sistemas de muro verde	32
Figura 4.12 Gráfico de temperatura exterior superficie de muro.....	37
Figura 4.13 Gráfico de temperatura exterior superficie de techo.....	38

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

En Chile, la operación de las edificaciones representa el 22 % del consumo de energía final. En el sector edificación aumentan un 1 % el consumo de energía y un 2 % las emisiones de CO2 cada año. Es necesario revertir esta tendencia, para cumplir los compromisos del país respecto al combate del cambio climático, teniendo un rol fundamental la eficiencia energética y sustentabilidad del sector edificación (Ministerio de Energía, 2020).

Una solución asociada a la eficiencia energética son las envolventes vegetales, utilizadas tanto en muros como en techos de edificaciones. Tienen beneficios asociados a la operación de las edificaciones, al ser un método de diseño pasivo, pueden disminuir el consumo de energía asociado a la climatización de espacios interiores debido al sobrecalentamiento de estos (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2018), además, tienen beneficios en el ambiente edificado y en el bienestar de las personas que lo habitan (ARUP, 2016).

Es importante conocer si las envolventes vegetales generarían beneficios en cuanto a eficiencia energética de los edificios, dadas las condiciones climáticas chilenas.

El Anexo 1.1 muestra la contribución de la Memoria de Título a los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

1.2 Objetivo general

Analizar técnica y ambientalmente la utilización de envoltente vegetal en edificios bajo condiciones climáticas chilenas.

1.3 Objetivos específicos

- Comparar desempeños energé-térmicos entre edificios con y sin envolvente vegetal.
- Identificar aspectos técnicos y económicos del uso de envolvente vegetal en edificios.
- Determinar impactos en el capital natural, capital humano y social, y capital manufacturado y financiero, asociado al uso de envolvente vegetal en edificios.

1.4 Metodología de trabajo

En primer lugar, se determinaron las configuraciones de casos a simular. Luego, se seleccionaron los datos de entradas para la simulación, tanto para los casos base como para los casos con envolvente vegetal. Después, se identificaron los modelos de edificios a utilizar, los cuales se modelaron en SketchUp. Posteriormente, se creó el modelo de simulación con el *software* Open Studio. Finalmente, se realizó la simulación y se obtuvieron los resultados, los cuales se analizaron.

Luego, se realizó una revisión bibliográfica para determinar aspectos técnicos asociados a las envolventes vegetales, y sus costos económicos para su implementación y operación.

Por último, se aplicó parte de la metodología de Ashby (2016) para conocer los impactos en los tres capitales (natural, humano y social, y manufacturado y financiero), en edificios con envolvente vegetal.

1.5 Alcances

El estudio se enfocó en el análisis del desempeño energé-térmico de edificios aislados, con las condiciones climáticas de las ciudades chilenas La Serena, Santiago, Concepción y Temuco y con dos diferentes funciones del edificio, residencial y de oficinas. Se consideró un caso base sin envolvente vegetal y un caso con envolvente vegetal en techo y muros orientados hacia norte, oriente y poniente. La aislación térmica de los edificios cumplió con lo propuesto en Estándares de Construcción Sustentable para Viviendas, Tomo II: Energía (MINVU, 2018), que es más exigente que la normativa

vigente. Para el análisis de desempeño energo-térmico se usó un *software* de simulación dinámica. Para la identificación técnica y económica del uso de envolvente vegetal, se consideraron los requisitos para la construcción y operación de estos sistemas, de acuerdo con la literatura existente. Se utilizó una metodología simplificada de la propuesta por Ashby (2016), para determinar los impactos en los tres capitales (natural, humano y social, y manufacturado y financiero).

1.6 Principales resultados y conclusiones

Los principales resultados de la simulación mostraron que la influencia del techo verde en la demanda energética del edificio era prácticamente nula, y que los muros verdes generaban un cambio contraproducente en la mayoría de los casos al aumentar la demanda de energía total. Al utilizar muro verde solo en la orientación norte del edificio, se lograron mejores resultados que si se utilizaba en tres orientaciones (norte, oriente y poniente), siendo el caso más favorable para el edificio residencial ubicado en Santiago con una disminución de 2.34 % de la demanda de energía anual. Para los edificios de oficinas ninguno de los casos simulados mostró una disminución de la demanda de energía total anual.

También, como resultado de los impactos en los tres capitales, se identificaron como positivos principalmente los beneficios medioambientales y sociales, y como negativos los altos costos de inversión y mantención de los sistemas de envolvente vegetal.

Se comprobó que el uso de envolvente vegetal en edificios no siempre puede asegurar un beneficio de ahorro energético, pero tiene una serie de beneficios medioambientales y sociales, que lo hacen una buena alternativa a considerar en proyectos de edificación.

Además, los beneficios medioambientales y sociales asociados al uso de envolvente vegetal en edificios, principalmente la reducción del efecto isla de calor urbana, mejoramiento de la calidad del aire y mejoramiento de la gestión de aguas lluvias, son importantes para el mejoramiento de la vida urbana presente y futura.

1.7 Organización de la memoria

Este documento consta de cinco capítulos. El primero es la introducción del trabajo realizado. El segundo es la revisión bibliográfica sobre las envolturas vegetales. El tercero es la metodología utilizada del trabajo, con los datos y procedimientos seguidos. El cuarto son los resultados obtenidos y su respectivo análisis. Finalmente, el quinto son las conclusiones y comentarios del trabajo realizado.

CAPÍTULO 2 ENVOLVENTE VEGETAL EN EDIFICIOS

2.1 Introducción

En este capítulo se presenta la problemática, los tipos de envolvente vegetal existentes y sus principales beneficios que tienen asociados. Luego, se presentan los principales resultados de investigaciones internacionales y nacionales, con respecto al ahorro energético al utilizar envolventes vegetales en edificios.

2.2 Problemática

La población urbana del país aumentaría llegando a 89.1 % en el año 2035 (Instituto Nacional de Estadísticas, s.f.) y en el 2050 se duplicará el stock de edificios construidos. La operación de las edificaciones representa el 22% del consumo de energía final en nuestro país, y el consumo de energía y emisiones de CO₂ del sector edificación aumenta un 1% y 2% cada año respectivamente, por lo que se hace necesario revertir esta tendencia para dar cumplimiento a los compromisos país en el combate al cambio climático. En este contexto y para lograr revertir la tendencia, la eficiencia energética y sustentabilidad del sector edificación juegan un rol fundamental, aportando, en un 17% a las metas de reducción de emisiones de CO₂ para lograr la carbono neutralidad en nuestro país (Ministerio de Energía. Gobierno de Chile, 2020).

2.3 Tipos de envolvente vegetal

Las cubiertas o techos verdes pueden clasificarse en intensivas, semi-intensivas o extensivas, según la profundidad del sustrato y las plantas utilizadas, como se observa en la figura 2.1. Las paredes o muros verdes se pueden dividir generalmente en dos categorías principales, fachadas verdes y paredes vivas, mostradas en la figura 2.2. Las fachadas verdes se basan generalmente en el uso de plantas trepadoras que crecen directamente contra la pared o tienen un sistema de soporte indirecto. En cambio, las paredes vivas, ya sean modulares o continuas, permiten un crecimiento de la vegetación

más uniforme a lo largo de la superficie y la aplicación de diferentes variedades de plantas (Manso *et al.*, 2021).

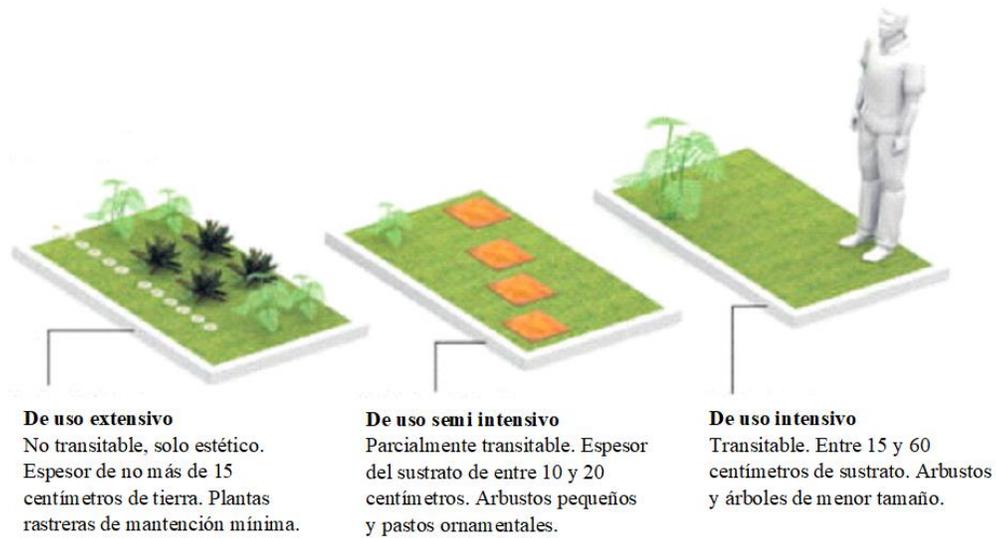


Figura 2.1 Imagen referencial de tipos de techos verdes.

Fuente: Plantas & Jardín (2013)



Figura 2.2 Imagen referencial de una fachada verde (izquierda) y pared viva (derecha).

Fuente: Watern Pennsylvania Conservancy (s.f.) y Revista Vivienda (2015)

2.4 Principales beneficios asociados a la envolvente vegetal

Las envolventes vegetales ofrecen una serie de beneficios en aspectos de energía, isla de calor y calidad del aire. Además, pueden gestionar el agua de lluvia, crear hábitats de agricultura urbana, dar

longevidad a las cubiertas, aumentar el valor inmobiliario y mejorar el bienestar por medio de la biofilia (ARUP, 2016).

En una revisión de las investigaciones existentes sobre los beneficios y costos de los techos y los muros verdes, realizada por Manso *et al.* (2021), encontraron que, en la última década, varios estudios han demostrado el potencial de los techos y muros verdes para mejorar la eficiencia energética de los edificios. Su rendimiento varía según las características del sistema (área foliar, geometría, tipo de sustrato, profundidad y contenido de humedad, materiales de cada capa y conexión al edificio), las características físicas del edificio (altura, aislamiento, materiales de construcción, envolvente del edificio, área de acristalamiento, orientación solar, sombreado) y las condiciones climáticas locales (estaciones, necesidades de calefacción o refrigeración).

Son varios los fenómenos que ocurren y que contribuyen para disminuir la temperatura al interior de una vivienda en condición de verano con envolvente vegetal (Canales, 2014):

- Intercambio por radiación desde las hojas de las plantas.
- Efectos de las plantas en los intercambios por convección.
- Evapotranspiración de las plantas.
- Conducción de calor (y almacenaje) en el sustrato.
- Efecto de sombra de las plantas.

2.5 Estudios internacionales sobre consumo energético en edificios con envolvente vegetal

En la investigación de Manso *et al.* (2021), realizaron una revisión de los resultados obtenidos por varios autores. El ahorro de energía en los edificios se obtiene mediante diferentes estudios basados en la comparación del uso de energía para calefacción y refrigeración entre un edificio cubierto con un techo verde (extensivo o intensivo) y un escenario estándar, donde el edificio incluye un techo plano tradicional. Los estudios se clasificaron según su ubicación y según el sistema de clasificación climática de Köppen-Geiger. De todas las regiones climáticas, el clima mediterráneo de verano caluroso (Csa) fue el que más se probó. También se obtuvieron resultados para el clima de selva tropical (Af), el clima desértico tropical y subtropical (Bwh), el clima semiárido cálido (BSh), el clima

marino de la costa oeste (Cfb) y el clima continental húmedo de verano cálido (Dfb). Los valores máximos de ahorro de energía según los estudios fueron:

Techo verde extensivo:

100 % Refrigeración (Cfb)

73 % Calefacción (Csa)

Techo verde Semi-intensivo:

67 % Refrigeración (Csa)

68 % Calefacción (Csa)

Techo verde intensivo:

84 % Refrigeración (Csa)

71 % Calefacción (Csa)

Respecto al potencial de los muros verdes, los estudios demuestran que en el clima mediterráneo de verano caluroso (Csa), en comparación con un muro convencional, las fachadas verdes pueden tener una eficiencia energética del 34 % y las paredes vivas del 59 % al 66 %, durante la temporada de enfriamiento.

En la investigación global de ARUP (2016), cuantificaron los beneficios de las envolventes edificadas vegetales, evaluando cinco ciudades del mundo: Berlín, Hong Kong, Melbure, Londres y Los Ángeles. Evaluaron la reducción de energía del edificio. Para esto, se realizó una simulación de un edificio de oficina de cada ciudad, se simuló el consumo de energía utilizando Energy Plus y se simularon las fachadas verticales verdes para cada orientación de los edificios como sombras sólidas. El estudio obtuvo una reducción de consumo promedio y máximo de energía entre 2 y 8 %, siendo menores que otros estudios que obtuvieron reducciones energéticas del 20-50 %. Esto se debe posiblemente a factores como que los muros están bien aislados, la radiación es menos crítica y a la demanda de enfriamiento.

2.6 Estudios nacionales sobre consumo energético en edificios con envolvente vegetal

En Chile, el edificio Consorcio, ubicado en Santiago e inaugurado en 1993, implementó una fachada vegetal, donde se incorporó vegetación aplicando una doble piel vegetal desde el piso 4 al 15, mostrado en la figura 2.3. Se utilizaron trepadoras y arbustos de mediana altura de hoja caduca, y un sistema de riego de tipo goteo. La cobertura de la doble piel vegetal es cerca del 27 % de la fachada norte y 51 % de la fachada oeste, equivalente al 26 % de la superficie total vertical del edificio. En el año 2007 se generó un estudio, en el cual se obtuvieron datos del comportamiento energético de 10 edificios corporativos, los cuales fueron comparados con los datos del Edificio Consorcio. Como resultado se tuvo que el Edificio Consorcio tiene un 48.8 % menos de consumo energético promedio que un edificio convencional de similares características, significando un ahorro monetario del 27.7 % respecto al promedio de los otros. Comparando también los pisos que tienen piel vegetal con pisos que no lo tienen del mismo edificio Consorcio Santiago, los primeros consumen un 35 % menos de energía, con un costo 25 % menor (Seguel, 2018). En la comparativa con los otros edificios, los porcentajes podrían estar algo exagerados por factores circunstanciales (como ubicación, altura, relación con edificios vecinos, densidad de ocupación interior, distribución y otros) y por eso realizaron la comparativa entre los diferentes pisos (ARQA, 2011).



Figura 2.3 Edificio Consorcio Santiago

Fuente: ArchDaily (2009)

Canales (2014), realizó una simulación a través de una modelación computacional con el programa *Design Builder* cuyo motor de cálculo es *EnergyPlus*, para cuantificar el ahorro energético que produciría la instalación de un techo verde en un edificio en Santiago, cuyos resultados se muestran en la tabla 2.1, donde se muestra que obtuvo una disminución de 5.51 % de la demanda de energía total para un año.

Tabla 2.1 Resultados de investigación techo verde Chile

<i>Fuel Breakdown</i>	Caso base (MWh)	Techo verde (MWh)	Δ (%)
<i>Cooling</i>	30.58	29.50	3.53
<i>Heating</i>	21.18	20.76	1.98
Total			5.51

Fuente: Canales (2014)

También, identificó que la disminución de demanda de energía para los pisos inferiores del edificio fue entre 0.23 % y 0.34 %, lo que podría despreciarse, pero para los últimos dos pisos si existía una disminución considerable con valores que llegaban al 27 %.

2.7 Conclusión

Las envolventes vegetales se pueden clasificar en techo verde intensivo, semi-intensivo y extensivo, y los muros verdes en fachadas verdes y paredes vivas. El uso de envolventes vegetales en edificios, pueden conllevar asociados varios beneficios, al centrarse en el consumo de energía durante la operación de la edificación. Todos los estudios revisados tanto internacionales como nacionales, obtienen un ahorro, el cual tiene una gran variación según las características del caso que se analiza.

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

3.1 Introducción

En este capítulo se presenta la metodología a seguir para realizar la Memoria de Título. Se presenta el método para realizar la simulación de desempeño energo-térmico, la determinación de aspectos técnicos y económicos, y la determinación de impactos en los tres capitales. Se presentan las variables a considerar y *softwares* necesarios para el desarrollo.

3.2 Método para simulación del desempeño energo-térmico

3.2.1 Configuración de casos

Se consideran cuatro ciudades de Chile, mostradas en la tabla 3.1, que representan diferentes zonas térmicas y en las que puede resultar beneficiosa la implementación de envolvente vegetal en sus edificios. Estas son: La Serena, Santiago, Concepción y Temuco. Para cada ciudad se consideran dos tipos de edificación según su función: residencial y de oficinas. Por último, se considera un caso base sin envolvente vegetal y otro con envolvente vegetal en techo y muros orientados hacia norte, oriente y ponientes.

Tabla 3.1. Ciudades elegidas y sus respectivas zonas térmicas.

Ciudad	Región	Zona térmica
La Serena	Coquimbo	C
Santiago	Metropolitana	D
Concepción	Biobío	E
Temuco	Araucanía	F

Fuente: MINVU (2018)

3.2.2 Definición de modelo de edificio

Se definen dos modelos de edificio según su función, uno residencial y otro de oficinas, los cuales se muestran en la figura 3.1 y 3.2, respectivamente. Cada uno cumple con la transmitancia térmica y

porcentaje de ventanas, según lo propuesto en el Estándares de Construcción Sustentable para Viviendas, Tomo II: Energía (MINVU, 2018), lo cuales son más exigentes que los presentados en la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones vigente (Decreto 47, 1992). Además, cumplen con la altura máxima permitida según el Plan Regulador de cada ciudad de estudio.

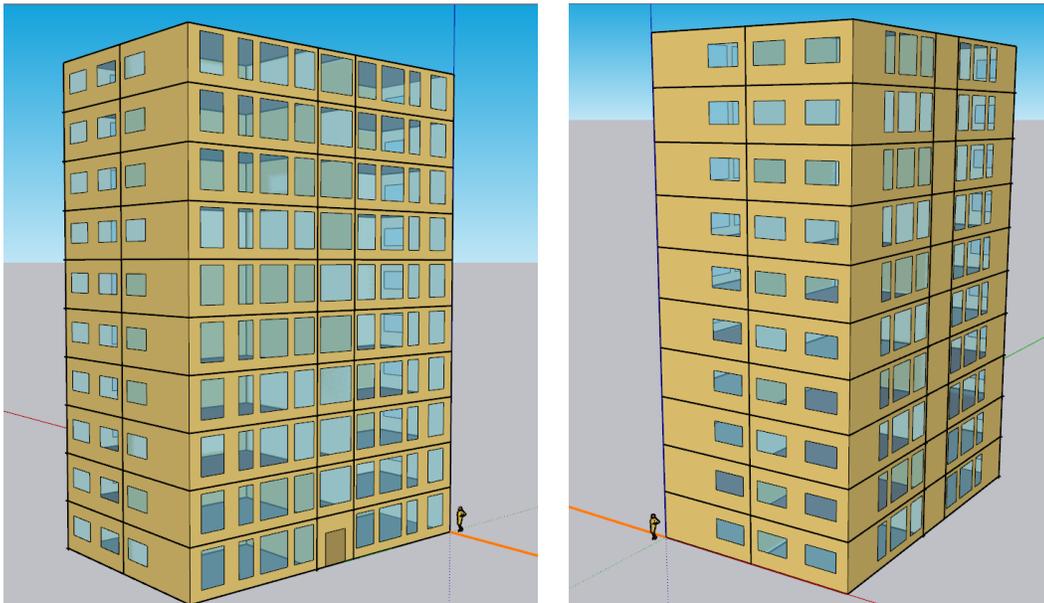


Figura 3.1 Edificio residencial vista norte y poniente (izquierda), vista sur y oriente (derecha). Línea naranja indica el norte.

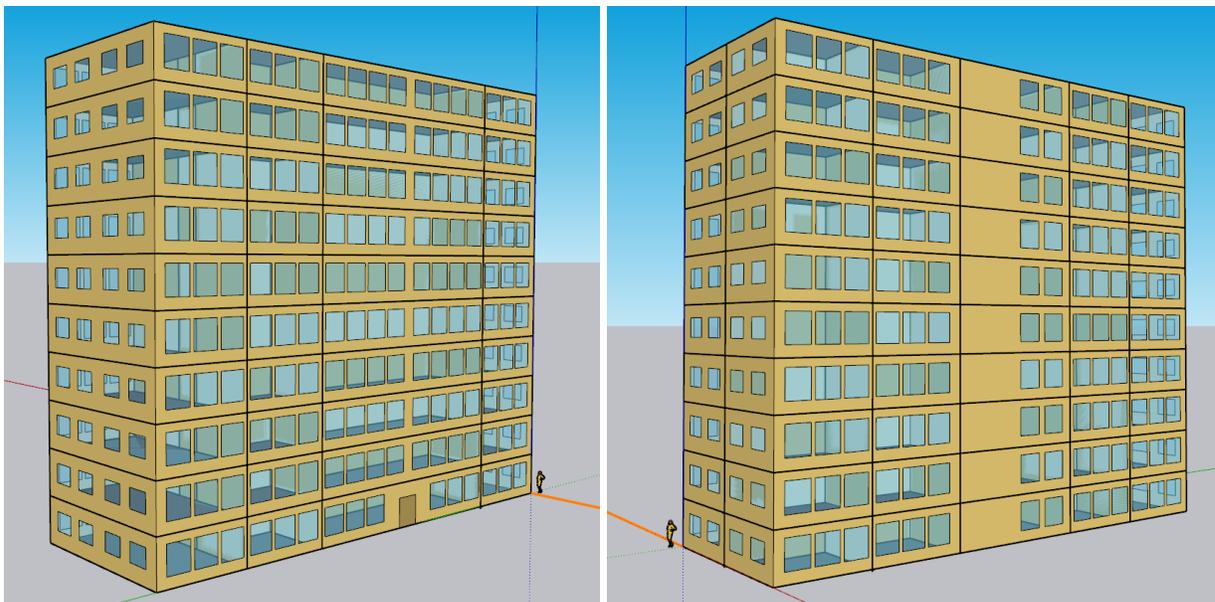


Figura 3.2 Edificio de oficinas vista norte y poniente (izquierda), vista sur y oriente (derecha). Línea naranja indica el norte.

La altura del edificio residencial y el de oficinas es de 30 m, cumpliendo las alturas máximas permitidas en el plan regulador de las ciudades en estudio. Además, en las zonas que se muestran en la tabla 3.2 se permiten la edificación residencial y de oficinas.

Tabla 3.2 Alturas máximas de edificación según Plan Regulador.

Ciudad	Decreto	Zona	Altura máxima de edificación (m)
La Serena	Decreto 1302 de 2020	Zona ZU-19 Alta Densidad Nor Oriente	30
Santiago	Decreto 6847 de 2021	Zona A	41.5
Concepción	Decreto 494 de 2021	Zona Eje de Servicio Comunal 2 ESC2	36
Temuco	Decreto 2181 de 2021	Zona Centro Base / ZHR2	31.5

En el Anexo 3.1.7, se muestran los materiales y ventanas utilizadas en los edificios modelados.

3.2.3 Datos de entrada para simulación

Para analizar el comportamiento energo-térmico de los edificios se realiza a través del uso de un *software* de simulación energética, cuyos datos de entrada se usan los valores referenciales entregados en Estándares de Construcción Sustentable para Viviendas, Tomo II: Energía (MINVU, 2018), donde se indican los archivos climáticos, zonificación de recintos interiores del modo energético, cargas internas asociadas a iluminación, cargas internas asociadas a ocupantes, cálculo de demanda térmica, construcción y materiales, infiltración y ventilación higiénica, ventilación por medio de aperturas de ventanas o puertas, y obstrucción a la radiación solar.

Para la simulación de los edificios de oficinas las tasas de ocupación y cargas internas se usan como datos de entradas los valores referenciales entregados en los anexos del Manual de Evaluación y Calificación (Instituto de la Construcción, 2014).

El Anexo 3.1 muestra los datos de entradas utilizados.

3.2.4 Definición de envolvente vegetal

El programa Open Studio, tiene incorporada dentro de su biblioteca de materiales una opción para definir techos verdes denominada *Roof Vegetation Material*. Se agrega el techo verde y se modifican los valores por defecto por los obtenidos de la investigación de Canales (2014), que se muestran en la tabla 3.3, correspondiente a un techo extensivo de sustrato de 10 cm de espesor.

Tabla 3.3 Variables modificadas para techo verde.

Variable	Valor
<i>Height Of Plants (m)</i>	0.1
<i>Leaf Area Index</i>	3.5
<i>Conductivity of Dry Soil (W/m-K)</i>	0.234
<i>Density of Dry Soil (kg/m3)</i>	910.0
<i>Specific Heat of Dry Soil (J/kg-K)</i>	1000.0
<i>Saturation volumetric Moisture Content Of The Soil Layer.</i>	0.5

Fuente: Canales (2014)

El techo verde, debe cumplir con lo indicado en la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones vigente (Decreto 47, 1992), que indica que la superficie de la azotea que puede ser destinada a vegetación es de máximo un 75 %. La superficie destinada a techo verde de los edificios modelados se presenta en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Superficie techo verde en edificios.

Edificio	Superficie de techo total (m2)	Superficie techo verde (m2)	Techo verde (%)
Residencial	273	175.5	64.3
Oficinas	401.2	278.8	69.5

Para el caso de los muros verdes, el programa no cuenta con una opción para incorporarlo de forma directa, por lo que se elige de las herramientas disponibles una con un comportamiento similar al del muro vegetal. Esto se logra empleando un elemento de sombra de edificio con la misma transmitancia que las plantas que componen el muro verde y al que se puede asignar un horario de transmitancia para poder evaluar vegetación de hoja caduca (Beato, 2019).

Se simula una fachada verde como un objeto de sombra a una distancia de 1.4 m desde el muro exterior del edificio, esto debido a que deja espacio para el fácil paso de los carros limpia fachadas como en el caso del edificio Consorcio de Santiago (Seguel, 2018). Se modela simulando plantas caducas, tal como se indica en el Estándares de Construcción Sustentable (MINVU, 2018). Al elemento de sombra se le asigna el horario de transmitancia indicado en la tabla 3.5 obtenido de Beato (2019) y adaptado a las estaciones del año en Chile.

Tabla 3.5 Horario transmitancia térmica de muro verde

Mes	Temporada	Valor de transmitancia
ENE – ABR	Con hojas	0.2
MAY - SEP	Sin hojas	0.825
OCT - DIC	Con hojas	0.2

Fuente: Beato (2019)

Primero, se consideran tres elementos de sombras, correspondientes a los muros verdes para las orientaciones norte, oriente y poniente. Luego, se considera solo un elemento de sombra correspondiente al muro verde de orientación norte, esto para ver como varía los resultados de demanda energética.

3.2.5 *Software* para simulación

El *software* de simulación energética debe estar acreditado mediante el método estandarizado para evaluación de programas computacionales de análisis energético de edificios, ANSI/ASHRAE Standars 140-2014. *International Building Performance Simulation Association* de Estados Unidos (IBPSA-USA) tiene un directorio publicado del listado de aplicaciones que están acreditadas, disponibles en www.buildingenergysoftwaretools.com (Minvu, 2018). De este listado, se eligen los programas Open Studio y Energy Plus, debido a que son gratuitos.

OpenStudio (2022), es una colección multiplataforma de herramientas de *software* para respaldar el modelado energético de edificios completos con EnergyPlus e incluye interfaces gráficas junto con un kit de desarrollo de *software* (SDK). Las aplicaciones gráficas incluyen: el complemento OpenStudio SketchUp, que permite a los usuarios crear rápidamente la geometría necesaria para

EnergyPlus, la aplicación OpenStudio el cual permite trabajar con modelos generados en SketchUp e incorporar los elementos que configuran el modelo de simulación, ResultsViewer permite navegar, trazar y comparar datos de salida de simulación, especialmente series de tiempo, y la herramienta de análisis paramétrico que permite estudiar el impacto de aplicar múltiples combinaciones de medidas de OpenStudio a un modelo base. Se usan las siguientes versiones compatible con SketchUp Pro 2021:

OpenStudio SketchUp Plug-in Versión 1.2.0, disponible en

<https://github.com/openstudiocoalition/openstudio-sketchup-plugin/releases/tag/v1.2.0>

Openstudio Application v1.2.0, disponible en

<https://github.com/openstudiocoalition/OpenStudioApplication/releases/tag/v1.2.0>

EnergyPlus (2022), incorporada en la versión de OpenStudio antes mencionada, es un programa completo de simulación de energía de edificios, es gratuito, de código abierto y multiplataforma. Es el motor de cálculo, se trata de un programa que trabaja en línea de comandos, por lo que su uso sería muy complicado si no fuera por todo el entorno de Open Studio y es el que se encarga de simular el edificio a partir de todos los datos introducidos, la geometría y el archivo de clima (Garcia, 2018).

Además, se usa SketchUp (2022), en su versión de prueba SketchUp Pro versión 2021, programa de modelado en tres dimensiones (3D) disponible en <https://www.sketchup.com/node/4816>.

3.2.6 Comparativas de resultados

Con los resultados de la simulación, se procede a analizar y comparar el desempeño energo-térmico para cada caso estudiado.

3.3 Determinación de aspectos técnicos y económicos de envolventes vegetales

De la literatura existente sobre envolventes vegetales, se determinan los aspectos técnicos y económicos que se deben tener en consideración durante la construcción y la operación. Aspectos que

se consideran son la selección de las plantas, sistemas constructivos, riego e interacción de la envolvente vegetal con el material del edificio.

La estimación de la demanda de riego se realiza según el procedimiento indicado en el apéndice 20 del Manual de Evaluación y Calificación (Instituto de la Construcción, 2014), y los datos utilizados se encuentran en el Anexo 3.3.

3.4 Determinación de impactos en los tres capitales

Se sigue parte de la metodología de cinco pasos presentada por Ashby (2016) en el libro *Materials and Sustainable Development*, que corresponden a:

- Paso 3. Investigación de hechos.

Existen seis grupos de información relevantes los cuales se deben investigar de manera objetiva: materiales, energía, medio ambiente, economía, regulación legal y sociedad.

- Paso 4. Síntesis

Consiste en reunir los hechos del Paso 3 para formar un juicio equilibrado sobre los impactos en las tres capitales: Capital natural (planeta), capital manufacturado y financiero (prosperidad), y capital humano y social (personas).

3.5 Conclusión

En este capítulo se ha mostrado la metodología a utilizar para el desarrollo y cumplimiento de los objetivos de la presente Memoria de Título.

CAPÍTULO 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Introducción

Se presentan los resultados de la simulación energo-térmica, comparando y analizando las demandas energéticas de los edificios para el caso base y para el caso con envolvente vegetal, identificando los principales aspectos técnicos a considerar al momento de implementar alguno de estos sistemas, sus costos de instalación y de operación. Finalmente, se muestra la síntesis de como esto impacta al capital natural, capital humano y social, y al capital manufacturado y financiero.

4.2 Resultados simulación energo-térmica

Los resultados de la demanda energética de la simulación dinámica se muestran a continuación, donde cada caso corresponde a:

- Sin EV: Edificio sin envolvente vegetal.
- Con EV (T): Edificio con envolvente vegetal, solo con techo verde.
- Con EV (M): Edificio con envolvente vegetal, solo con muro verde.
- Con EV (T+M): Edificio con envolvente vegetal, con techo y muro verde.

Como dato adicional que no se muestra en las tablas, se tiene que:

Edificio residencial

- Área total: 2730 m²
- Demanda energética de iluminación interior: 6011 m²

Edificio de oficinas

- Área total: 4012 m²
- Demanda energética de iluminación interior: 100872 m²
- Demanda energética de equipos eléctricos interiores: 113056 m²

4.2.1 Edificio residencial

En las siguientes figuras, se muestran los resultados de forma gráfica de las demandas de energía mensual del caso base, para el edificio residencial de cada ciudad.

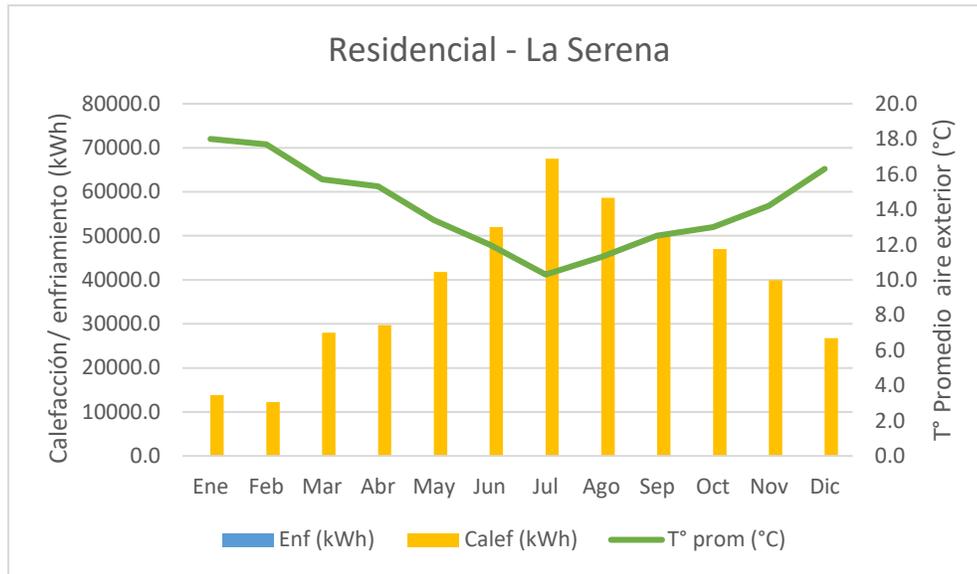


Figura 4.1 Gráfico de resultados caso base residencial La Serena

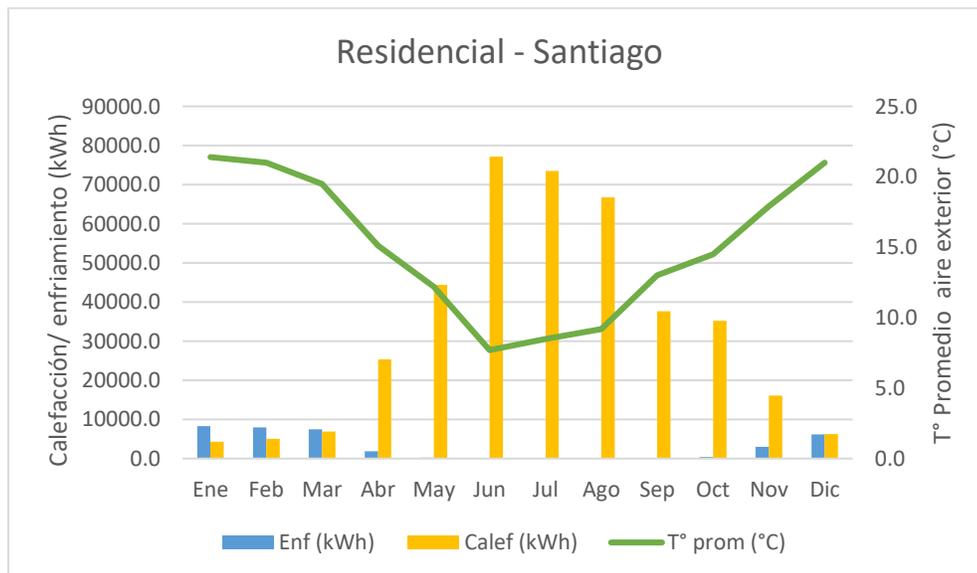


Figura 4.2 Gráfico de resultados caso base residencial Santiago

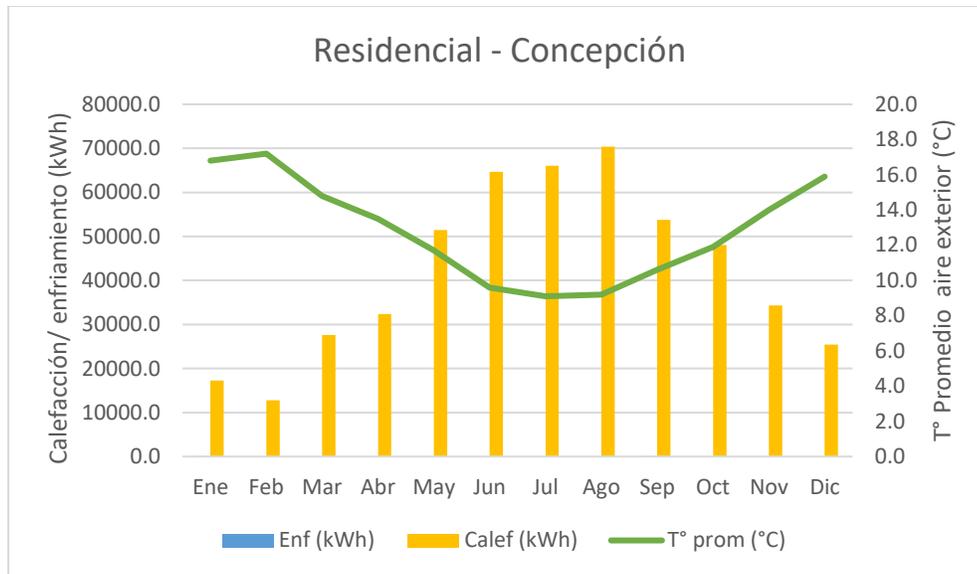


Figura 4.3 Gráfico de resultados caso base residencial Concepción

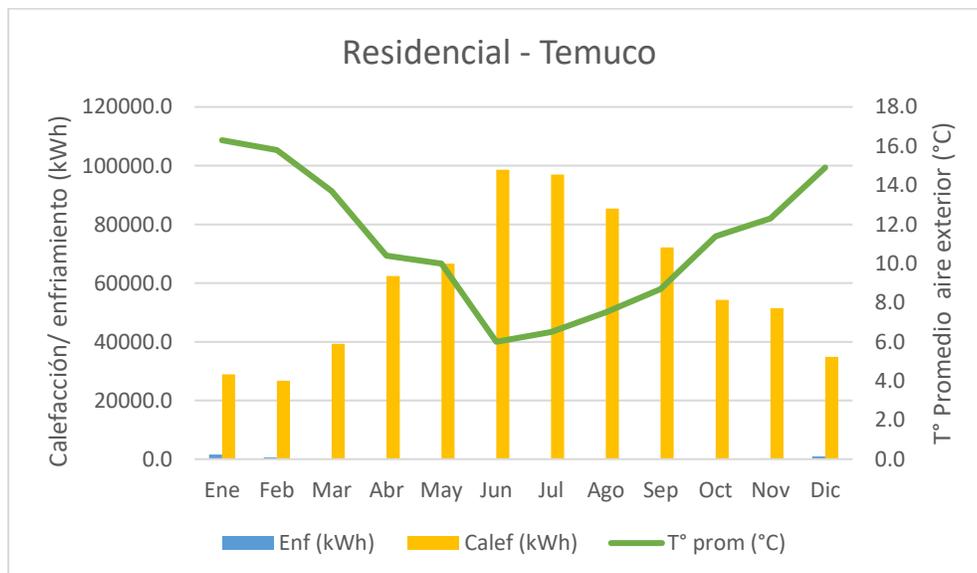


Figura 4.4 Gráfico de resultados caso base residencial Temuco

De los gráficos anteriores, se observa que para las cuatro ciudades en todos los meses se requiere de energía para calefacción y que las demandas de energía de enfriamiento son bajas, siendo solo en el caso de Santiago un poco mayor.

Los resultados de la demanda energética anual del edificio residencial, tanto del caso base como de los casos con envolvente vegetal, se muestran en la tabla 4.1. Se consideró muro verde en las orientaciones norte, oriente y poniente.

Tabla 4.1 Demanda energética de edificio residencial.

Caso	Energía Total (kWh)	Energía (kWh/m ²)	Calefacción (kWh)	Enfriamiento (kWh)	Enf (%)
La Serena					
Sin EV	473922	173.6	467911	0	0
Con EV (T)	473122	173.3	467111	0	
Con EV (M)	494547	181.15	488533	0	
Con EV (T+M)	493822	180.89	487811	0	
Santiago					
Sin EV	440519	161.36	398803	35706	8
Con EV (T)	440244	161.26	398744	35489	
Con EV (M)	439581	161.02	413661	19908	
Con EV (T+M)	439411	160.96	413714	19683	
Concepción					
Sin EV	510175	186.88	504122	42	0
Con EV (T)	509756	186.72	503703	39	
Con EV (M)	530911	194.47	524869	31	
Con EV (T+M)	530544	194.34	524506	31	
Temuco					
Sin EV	727550	266.5	717769	3769	1
Con EV (T)	727236	266.39	717467	3756	
Con EV (M)	745061	272.92	737081	1969	
Con EV (T+M)	744772	272.81	736803	1958	

En la tabla 4.2 y 4.3, se muestra los cambios porcentuales de la demanda de energía al simular el edificio residencial para los casos con envolvente vegetal. El signo negativo significa una disminución de la demanda y sin signo un aumento de la demanda.

Tabla 4.2 Cambio porcentual de demanda energética en edificio residencial.

Caso	Energía Total (%)	Energía/m ² (%)	Calefacción (%)	Enfriamiento (%)
La Serena				
Con EV (T)	-0.17	-0.17	-0.17	-
Con EV (M)	4.35	4.35	4.41	-
Con EV (T+M)	4.20	4.20	4.25	-
Santiago				
Con EV (T)	-0.06	-0.06	-0.01	-0.61
Con EV (M)	-0.21	-0.21	3.73	-44.24
Con EV (T+M)	-0.25	-0.25	3.74	-44.87
Concepción				
Con EV (T)	-0.08	-0.09	-0.08	-7.14
Con EV (M)	4.06	4.06	4.12	-26.19
Con EV (T+M)	3.99	3.99	4.04	-26.19

Tabla 4.3 Cambio porcentual de demanda energética en edificio residencial (cont.).

Caso	Energía Total (%)	Energía/m2 (%)	Calefacción (%)	Enfriamiento (%)
Temuco				
Con EV (T)	-0.04	-0.04	-0.04	-0.34
Con EV (M)	2.41	2.41	2.69	-47.76
Con EV (T+M)	2.37	2.37	2.65	-48.05

Se observa que para los casos con envolvente vegetal solo con techo verde, en las cuatro ciudades su influencia en la demanda total de energía es prácticamente nula. Esto se puede deber a lo bien aislado que se encuentra el techo, ya que existen varios estudios que han demostrado que los sistemas de techos verdes pueden ser más efectivos cuando se aplican a edificios menos aislados (Manso *et al.*, 2021). Además, como había identificado Canales (2014), los techos verdes tienen un mayor efecto en los pisos superiores, por lo que en edificaciones más horizontales el efecto en la disminución de demanda energética podría ser mayor.

En los casos con muro verde como envolvente vegetal, el muro con su sombra genera una disminución de la temperatura, lo cual tiene como consecuencia que la demanda de energía de enfriamiento disminuya, pero que a su vez la demanda de energía de calefacción aumente. Como se observó en los resultados del caso base, se tiene que en todos los meses existe demanda de energía de calefacción, por lo que, el uso del muro verde genera un cambio contraproducente, aumentando la demanda de energía total en los edificios de La Serena, Concepción y Temuco. El único caso que muestra una pequeña disminución de la demanda total es el edificio ubicado en Santiago.

Se observa que al considerar solo la demanda de enfriamiento se observa una gran disminución. La demanda inicial es relativamente pequeña por lo que un pequeño ahorro resulta en un gran cambio porcentual, pero también se puede ver el efecto del muro verde el cual es el principal factor de la disminución de la demanda de enfriamiento, obteniendo resultados incluso similares al de otros estudios. Es importante al usar sistemas de envolvente vegetal, ver su influencia no solo en la demanda de enfriamiento, sino que, en la demanda total de energía, para saber si resulta beneficioso en términos energéticos su implementación.

Muro verde solo en la orientación norte

Para ver si variaban los resultados, se modificó la envolvente vegetal dejando el techo verde y el muro solo en la orientación norte, obteniendo los siguientes resultados anuales para el caso de edificio residencial mostrados en la tabla 4.4 y los cambios porcentuales en la tabla 4.5.

Tabla 4.4 Demanda energética de edificio residencial

Caso	Energía Total (kWh)	Energía (kWh/m ²)	Calefacción (kWh)	Enfriamiento (kWh)
La Serena				
Con EV (M)	471819	172.28	465806	0
Con EV (T+M)	471072	172.55	465061	0
Santiago				
Con EV (M)	430228	157.59	395008	29208
Con EV (T+M)	429986	157.5	395000	28975
Concepción				
Con EV (M)	506728	185.61	500675	42
Con EV (T+M)	506350	185.48	500297	42
Temuco				
Con EV (M)	724825	265.5	716061	2753
Con EV (T+M)	724528	265.39	715775	2739

Tabla 4.5 Cambio porcentual de demanda energética en edificio residencial.

Caso	Energía Total (%)	Energía/m ² (%)	Calefacción (%)	Enfriamiento (%)
La Serena				
Con EV (M)	-0.44	-0.76	-0.45	-
Con EV (T+M)	-0.60	-0.60	-0.61	-
Santiago				
Con EV (M)	-2.34	-2.34	-0.95	-18.20
Con EV (T+M)	-2.39	-2.39	-0.95	-18.85
Concepción				
Con EV (M)	-0.68	-0.68	-0.68	0.00
Con EV (T+M)	-0.75	-0.75	-0.76	0.00
Temuco				
Con EV (M)	-0.37	-0.38	-0.24	-26.96
Con EV (T+M)	-0.42	-0.42	-0.28	-27.33

Se observan que una configuración de solo muro verde en la orientación norte da mejores resultados que con muro verde en las tres orientaciones. En todas las ubicaciones se ve una disminución de la demanda energética con respecto al caso base sin envolvente vegetal, pero aun siendo una disminución

pequeña. El caso más favorable es el edificio residencial ubicado en Santiago, cuya demanda energética disminuye cerca de 2.34 % al año con respecto al caso base.

4.2.2 Edificio de oficinas

En las siguientes figuras, se muestran los resultados de forma gráfica de las demandas de energía mensuales del caso base, para el edificio de oficinas de cada ciudad.

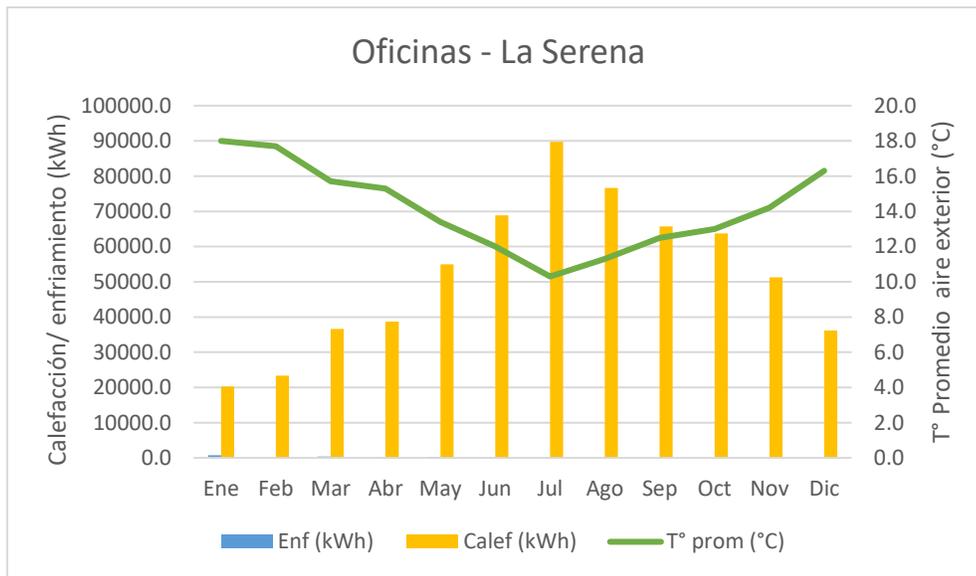


Figura 4.5 Gráfico de resultados caso base oficinas La Serena

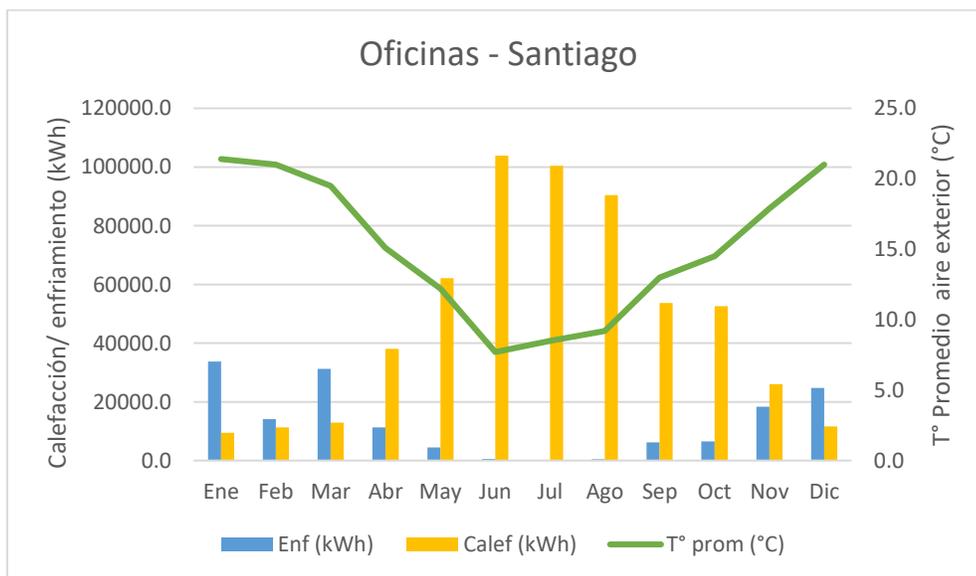


Figura 4.6 Gráfico de resultados caso base oficinas Santiago

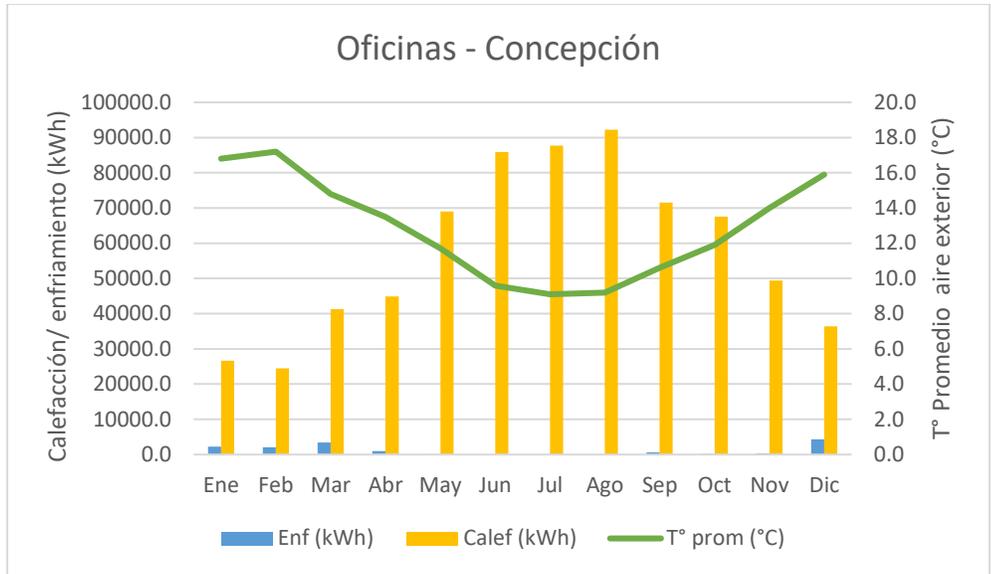


Figura 4.7 Gráfico de resultados caso base oficinas Concepción

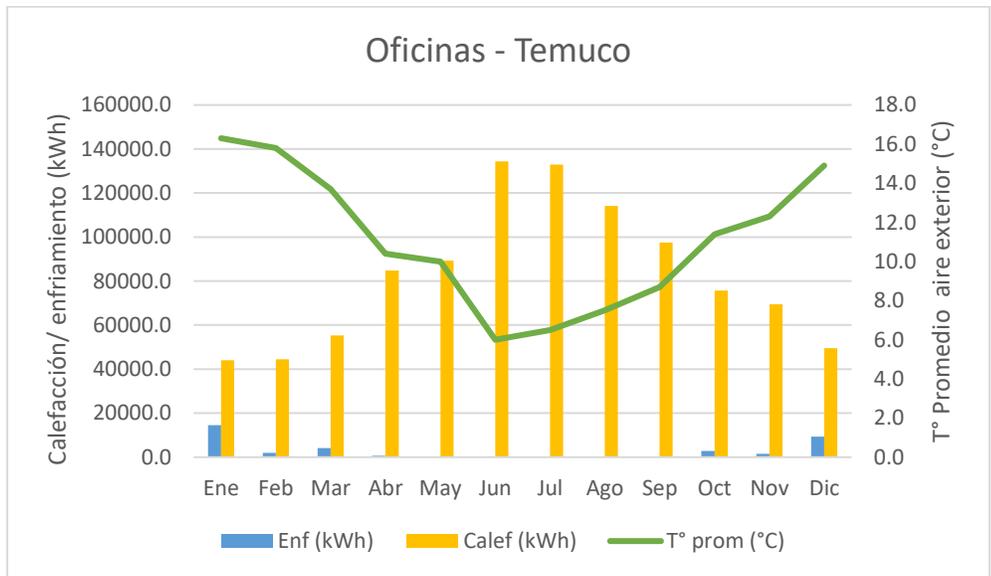


Figura 4.8 Gráfico de resultados caso base oficinas Temuco

De los gráficos anteriores, se observan resultados similares a los obtenidos para el caso del edificio residencial. Para las cuatro ciudades, en todos los meses se requiere de energía para calefacción y la demanda de energía de enfriamiento solo en el caso de Santiago llega a ser un poco más relevante.

Los resultados de la demanda energética anual del edificio de oficinas se muestran en la tabla 4.6. Se observa que al igual que para el caso del edificio residencial, la demanda de enfriamiento para el caso base sin envolvente vegetal es baja para los edificios ubicados en La Serena, Concepción y Temuco,

y para el edificio ubicado en Santiago en un poco mayor, correspondiendo al 16 % de la demanda total de energía.

Tabla 4.6 Demanda energética de edificios de oficinas.

Caso	Energía Total (kWh)	Energía (kWh/m2)	Calefacción (kWh)	Enfriamiento (kWh)	Enf (%)
La Serena					
Sin EV	841489	209.74	626117	1444	0
Con EV (T)	840658	209.54	625297	1433	
Con EV (M)	891039	222.09	676625	486	
Con EV (T+M)	890306	221.91	675892	486	
Santiago					
Sin EV	938153	233.84	572328	151897	16
Con EV (T)	937950	233.79	572533	151489	
Con EV (M)	950528	236.92	621439	115161	
Con EV (T+M)	950319	236.87	621744	114644	
Concepción					
Sin EV	924803	230.51	696778	14097	2
Con EV (T)	924450	230.42	696456	14067	
Con EV (M)	974772	242.96	755025	5822	
Con EV (T+M)	974478	242.89	754772	5778	
Temuco					
Sin EV	1240328	309.15	997236	35167	3
Con EV (T)	1240006	309.07	990986	35092	
Con EV (M)	1279069	318.81	1042533	22608	
Con EV (T+M)	1278781	318.74	1042314	22536	

En la tabla 4.7 y 4.8 se muestra los cambios porcentuales de la demanda de energía al simular el edificio de oficinas para los casos con envolvente vegetal. El signo negativo significa una disminución de la demanda y sin signo un aumento de la demanda.

Tabla 4.7 Cambio porcentual de demanda energética en edificio de oficinas.

Caso	Energía Total (%)	Energía/m2 (%)	Calefacción (%)	Enfriamiento (%)
La Serena				
Con EV (T)	-0.10	-0.10	-0.13	-0.76
Con EV (M)	5.89	5.89	8.07	-66.34
Con EV (T+M)	5.80	5.80	7.95	-66.34

Tabla 4.8 Cambio porcentual de demanda energética en edificio de oficinas (cont.).

Caso	Energía Total (%)	Energía/m2 (%)	Calefacción (%)	Enfriamiento (%)
Santiago				
Con EV (T)	-0.02	-0.02	0.04	-0.27
Con EV (M)	1.32	1.32	8.58	-24.18
Con EV (T+M)	1.30	1.30	8.63	-24.53
Concepción				
Con EV (T)	-0.04	-0.04	-0.05	-0.21
Con EV (M)	5.40	5.40	8.36	-58.70
Con EV (T+M)	5.37	5.37	8.32	-59.01
Temuco				
Con EV (T)	-0.03	-0.03	-0.63	-0.21
Con EV (M)	3.12	3.12	4.54	-35.71
Con EV (T+M)	3.10	3.10	4.52	-35.92

Se observa que para los casos con envolvente vegetal solo con techo verde, se obtienen resultados similares a los obtenidos en la simulación del edificio residencial, una disminución en la demanda de energía que prácticamente es nula.

Se puede ver el efecto del muro verde en la disminución de la demanda de enfriamiento. De igual manera que para el caso del edificio residencial, la implementación del muro verde genera un cambio contraproducente, ya que genera un aumento de la demanda de calefacción. A diferencia de los casos del edificio residencial, para los edificios de oficinas en ninguna ubicación resultó ser beneficioso el uso de muro verde.

Muro verde solo en la orientación norte

Igual que para el caso del edificio residencial, para ver si variaban los resultados, se modificó la envolvente vegetal dejando el techo verde y el muro verde solo en la orientación norte. Se obtuvo los siguientes resultados anuales para el caso de edificio de oficinas mostrados en la tabla 4.9 y los cambios porcentuales en la tabla 4.10.

Tabla 4.9 Demanda energética de edificio de oficinas.

Caso	Energía Total (kWh)	Energía (kWh/m2)	Calefacción (kWh)	Enfriamiento (kWh)
La Serena				
Con EV (M)	871242	217.16	656633	681
Con EV (T+M)	870494	216.97	655892	675
Santiago				
Con EV (M)	945875	235.76	602722	129225
Con EV (T+M)	945661	235.71	603011	128722
Concepción				
Con EV (M)	955450	238.15	733150	8369
Con EV (T+M)	955139	238.07	732883	8328
Temuco				
Con EV (M)	1263008	314.81	1022847	26236
Con EV (T+M)	1262708	314.73	1022622	26158

Tabla 4.10 Cambio porcentual de demanda energética en edificio de oficinas.

Caso	Energía Total (%)	Energía/m2 (%)	Calefacción (%)	Enfriamiento (%)
La Serena				
Con EV (M)	3.54	3.54	4.87	-52.84
Con EV (T+M)	3.45	3.45	4.76	-53.25
Santiago				
Con EV (M)	0.82	0.82	5.31	-14.93
Con EV (T+M)	0.80	0.80	5.36	-15.26
Concepción				
Con EV (M)	3.31	3.31	5.22	-40.63
Con EV (T+M)	3.28	3.28	5.18	-40.92
Temuco				
Con EV (M)	1.83	1.83	3.19	-25.40
Con EV (T+M)	1.80	1.80	3.17	-25.62

Se observa que una configuración de muro verde solo en la orientación norte da mejores resultados que con muro verde en las tres orientaciones. A diferencia de los resultados del edificio residencial, para el caso del edificio de oficinas en ninguna ubicación se obtiene un ahorro energético.

Se probó para el caso de oficinas con muro verde solo en orientación norte ubicado en Santiago, si el horario de vacaciones asociado a este tipo de edificios era la razón de que no resultara una disminución de la demanda energética. Se observa en la tabla 4.11, que el horario no influye de gran manera e igualmente no resulta beneficioso. Las principales diferencias entre los edificios de oficinas y residencial, a lo que se puede asociar que no resulta beneficioso es a la geometría del edificio y a las cargas internas asociadas.

Tabla 4.11 Cambio porcentual en edificio de oficinas sin horario de vacaciones.

Caso	Energía Total (%)	Energía/m2 (%)	Calefacción (%)	Enfriamiento (%)
Santiago				
Con EV (M)	0.72	0.72	5.27	-13.74

4.3 Aspectos técnicos de la envolvente vegetal

Se presentan aspectos técnicos identificados de diferentes autores relacionados a la selección de plantas, los sistemas constructivos, el riego y la interacción de la envolvente vegetal con el material del edificio.

4.3.1 Selección de plantas

En la selección de las especies de plantas a utilizar se deben tener en consideración varios aspectos. A continuación, se presentan los principales recolectados de los autores Manso y Castro-Gomez (2015), Estrella (2018), Guevara (2020), Olivieri (2013), Pereira (2016) y Canales (2014):

- Condiciones climáticas (temperatura, viento, precipitaciones, calor, sequía y heladas).
- Condiciones locales de exposición (sol, semisombra o sombra).
- Las necesidades de riego y nutrientes.
- Regímenes de mantenimiento.
- La altura de crecimiento de la especie vegetativa y su velocidad de crecimiento.
- Tipo de follaje (perenne o caducifolio)
- Aspecto visual, punto de floración y la dominancia de una especie sobre otra.

La mejor opción son las especies autóctonas o nativas, así se evita la arriesgada introducción de especies vegetales alóctonas (de fuera del medio natural donde se realice la fachada) que pueden reproducirse de forma incontrolada en el medio natural y afectar o entrar en competencia con las especies locales. También, serán las mejor adaptadas al medio ambiente ya que han evolucionado para ese medio en concreto (Pereira, 2016).

Las plantas *sedum*, como la mostrada en la figura 4.9, no son nativas, pero mundialmente han demostrado un comportamiento superior a muchas otras especies de plantas, principalmente por su capacidad de resistir sequías y condiciones de clima adverso (Canales, 2014). Estas especies de plantas reduce las necesidades de riego, tienen un bajo mantenimiento y contribuyen a la minimización del peso del sistema (Manso y Castro-Gomez, 2015)



Figura 4.9 Planta *Sedum spurium*

Fuente: JardineriaOn (2020)

En el Manual de evaluación y Calificación (Instituto de la Construcción, 2014) en su apéndice 19, se presenta una tabla de referencia de especies que se pueden utilizar y las especies que son dañinas al momento de proyectar paisajismo en construcciones de edificación. Sirven de referencia para la selección de plantas, aunque no son necesariamente las óptimas para envolventes vegetales.

En Chile, no existe un documento con especies vegetales recomendadas específicamente para techos y muros verdes, como sí ocurre en Colombia donde crearon un catálogo con el cual buscan fortalecer el conocimiento y facilitar la selección de especies vegetales más adecuadas para ser implementadas (Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, 2021).

4.3.2 Sistemas constructivos

Los componentes mínimos que conforman a los sistemas de techo verde son: la estructura de soporte, la impermeabilización, la protección anti raíces, el drenaje, el filtro, la capa de sustrato, la vegetación

y el sistema de riego, como se muestra en la figura 4.10. La principal diferencia entre los sistemas de techo verde es el espesor del sustrato y la vegetación que se puede utilizar.

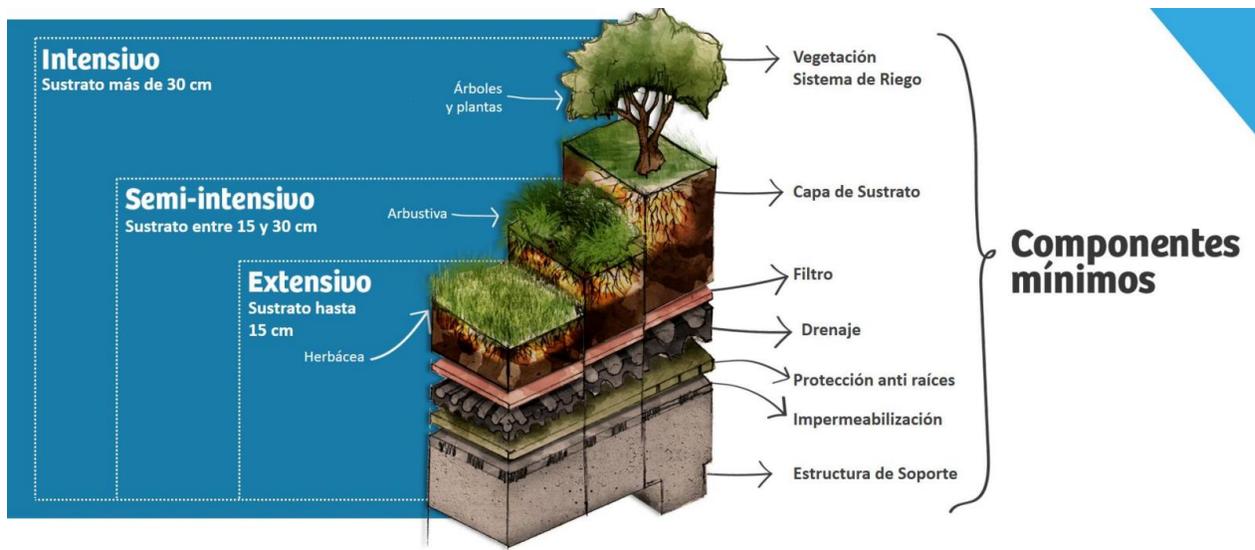


Figura 4.10 Componentes mínimos de sistema de techo verde

Fuente: MINVU (2021)

Los elementos principales que conforman a los sistemas de muro verde son: los elementos de soporte, el medio de cultivo, la vegetación, el riego y el drenaje. En la tabla 4.12 y 4.13, se muestran un resumen de los componentes de los sistemas de muros verdes, obtenido de Manso y Castro-Gomez (2015). En la figura 4.11, se muestra algunas configuraciones de muros verdes.

Tabla 4.12 Componentes principales de muros verdes.

Requisitos del sistema	Fachadas verdes	Muros vivos continuos	Muros vivos modulares
Apoyo	Cables, cuerdas, redes, enrejados en acero inoxidable, acero galvanizado, madera, plástico, fibra de vidrio.	Fielros geotextiles.	Acero galvanizado, acero inoxidable, polímeros ligeros y/o flexibles, cerámicos.
Medio creciente	Suelo molido o recipientes llenos de sustrato.	-	Mezcla de sustrato que incluye compuestos orgánicos y/o inorgánicos.
Vegetación	Plantas trepadoras (perennifolias o caducifolias)	Arbustos, pastos y plantas perennes.	Arbustos, pastos, plantas perennes y suculentas.

Fuente: Manso y Castro-Gomez (2015)

Tabla 4.13 Componentes principales de muros verdes (cont.)

Requisitos del sistema	Fachadas verdes	Muros vivos continuos	Muros vivos modulares
Drenaje	Vasos con orificios inferiores.	-	Agujeros laterales e inferiores.
Irrigación	Líneas de goteo dentro de los recipientes.	Línea de goteo en la parte superior de la pared.	Línea de goteo en la parte superior de cada módulo.

Fuente: Manso y Castro-Gomez (2015)

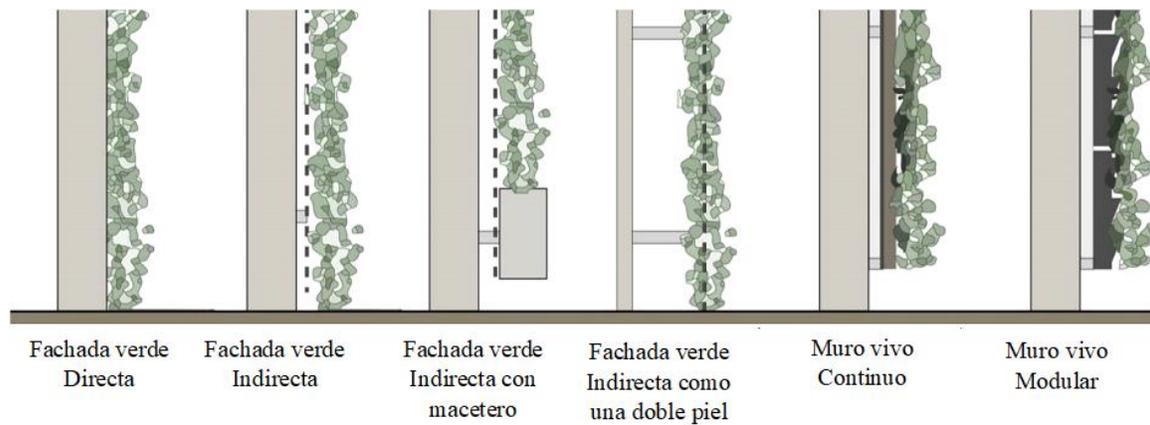


Figura 4.11 Sistemas de muro verde

Fuente: Gunawardena y Steemers (2019)

4.3.3 Riego

La demanda de riego estimada según el procedimiento indicado en el apéndice 20 del Manual de Evaluación y Calificación (Instituto de la Construcción, 2014), para los principales tipos de vegetación utilizados en las envolventes vegetales, se presenta en la tabla 4.14 y 4.15. Para esto se consideró el sistema de riego más eficiente, correspondiente a goteo.

Tabla 4.14 Demanda estimada de riego.

Localidad	Tipo de vegetación	AD (l/mes/m2)
La Serena	Arbustos, trepadoras y crasas	133.6
	Tapizantes, cubresuelos y herbáceas	133.6
Santiago	Arbustos, trepadoras y crasas	151.7
	Tapizantes, cubresuelos y herbáceas	151.7

Tabla 4.15 Demanda estimada de riego (cont.)

Localidad	Tipo de vegetación	AD (l/mes/m ²)
Concepción	Arbustos, trepadoras y crasas	101.8
	Tapizantes, cubresuelos y herbáceas	101.8
Temuco	Arbustos, trepadoras y crasas	123.5
	Tapizantes, cubresuelos y herbáceas	123.5

El consumo de agua de las envolventes vegetales se asocia principalmente a tres factores:

- El tipo de planta elegido y sus necesidades de agua
- La posibilidad de re-ciclo del agua a través de un sistema cerrado
- La posibilidad de utilizar el agua de lluvia recolectada.

La posibilidad del re-ciclo del agua o de la utilización de agua de lluvia depende principalmente de las instalaciones previstas en el edificio en el que se implemente la envolvente vegetal (Olivieri, 2013).

En la tabla previa solo se considera el tipo de planta y sus necesidades de agua.

4.3.4 Interacción de la envolvente vegetal con material del edificio

Canales (2014), identificó de otros autores que los techos verdes tienen una vida útil mayor, entre dos a tres veces que la de un techo tradicional, principalmente debido a la disminución de la fluctuación de temperatura en los materiales que forman parte, quedando sometidos a un estrés térmico menor.

En el caso de muros verdes, Pereira (2016) identificó de varios autores, que en los sistemas donde la planta crece directamente apoyada de la pared del edificio puede acelerar el deterioro si estas ya estuvieran dañadas previamente con huecos o grietas. Por otro lado, las envolventes vegetales pueden proporcionar protección contra daños por acción del viento, del sol, de la lluvia o de contaminantes.

4.4 Aspectos económicos de la envolvente vegetal

Manso *et al.* (2021), identificaron valores promedios de costos de envolventes vegetales de diferentes autores y países, principalmente de Norteamérica y Europa. Estos se muestran a continuación, con los costos originales en euros (€) y su equivalencia en pesos chilenos (\$), considerando 1€ = \$950.

Los pocos datos que se encontraron de costos en Chile solo consideraban el costo de materiales para la construcción de los sistemas, por lo que no fueron incluidos.

4.4.1 Costos de instalación

En la tabla 4.16 se muestran los costos de instalación, estos costos consideran la inversión inicial en la aplicación del sistema, incluyendo el costo de transporte, materiales y mano de obra.

Tabla 4.16 Costos de instalación de envolventes vegetales

	Costo promedio (€/m²)	Costo promedio (\$/m²)
Techos verdes extensivos	99	94050
Techos verdes semi-intensivos	130	123500
Techos verdes intensivos	362	343900
Fachadas verdes	190	180500
Muros vivos	750	712500

Fuente: Manso *et al.* (2021)

4.4.2 Costos de operación y mantenimiento

En la tabla 4.17 y 4.18 se muestran los costos de operación y mantenimiento.

Tabla 4.17 Costos de operación y mantenimiento de envolventes vegetales.

	Costo promedio (€/m²/año)	Costo promedio (\$/m²/año)
Techos verdes extensivos	4.28	4066
Techos verdes semi-intensivos	7.77	7382
Techos verdes intensivos	5.64	5358

Fuente: Manso *et al.* (2021)

Tabla 4.18 Costos de operación y mantenimiento de envolventes vegetales (cont.)

	Costo promedio (€/m ² /año)	Costo promedio (\$/m ² /año)
Fachadas verdes	5.57	5292
Muros vivos	18.98	18031

Fuente: Manso *et al.* (2021)

4.5 Investigación de los hechos

Se complementa la información obtenida tanto de la simulación energo-térmica, como de los aspectos técnicos y económicos previamente presentados, y se ordenan según correspondan a los hechos de energía, medio ambiente, economía, regulación legal o sociedad.

4.5.1 Energía

De los resultados de la simulación energo-térmica presentados en la sección 4.2 del presente capítulo, se observó que la implementación de techo verde su influencia en la demanda de energía de los edificios es prácticamente nula. La implementación de muro verde a los edificios resultó en un aumento de la demanda de energía en casi todos los casos, siendo la simulación del edificio residencial ubicado en Santiago el cual mostró una mayor disminución.

4.5.2 Medio Ambiente

El uso de envolventes vegetales tiene asociado una serie de beneficios ambientales, siendo los tres principales:

- La reducción del efecto isla de calor urbana.
- Mejoramiento de la calidad del aire
- Mejoramiento de la gestión de aguas lluvias.

Reducción del efecto isla de calor urbana

El efecto isla de calor urbana es el incremento de la temperatura ambiente promedio en zonas urbanas, que se produce por el reemplazo de la vegetación natural por pavimentos, edificaciones y otras estructuras destinadas a dar hábitat a la población (Corporación del Desarrollo Tecnológico, 2010). Además, también favorece este efecto la altura de los edificios, ya que generan el llamado efecto cañón, la producción de CO₂ y el calor provocado por los combustibles fósiles, producciones industriales, entre otros (Navarro, 2013)

La incorporación de vegetación en superficies expuestas directamente al sol contribuye a mejorar los procesos naturales de enfriamiento ambiental, como la fotosíntesis y evapotranspiración. La fotosíntesis absorbe energía que en el caso de no haber vegetación se transformaría en calor ambiente y la evapotranspiración mantiene los equilibrios naturales de humedad ambiente (CDT, 2010)

La vegetación se considera como una de las medidas más eficaces para la mejora del microclima urbano si su aplicación fuera a gran escala. El tipo de planta utilizadas pueden alterar la eficacia de en términos de mitigación del efecto isla de calor. Sin embargo, la superficie de las cubiertas verdes muestra ser más frías que respecto de las superficies convencionales, muestran que pueden compensar uno de los principales factores que causa el efecto isla de calor urbano: el sobrecalentamiento de las superficies (Olivieri, 2013)

De los resultados obtenidos de la simulación, es posible ver el potencial del uso de envolvente vegetal para la disminución de las islas de calor, con la variación de la temperatura superficial exterior del muro y techo del edificio.

En la tabla 4.19, se muestran la variación de la temperatura exterior de una superficie, que corresponde al muro en la orientación norte en el piso 6, sin envolvente vegetal y con envolvente vegetal con muro verde en la orientación norte. En la figura 4.12 se muestran estos resultados de forma gráfica.

Considerando los meses donde el muro verde se encuentra con hojas (ENE-ABR y OCT-DIC), se tiene una disminución promedio de 5 °C de la temperatura de la superficie del muro exterior del edificio.

Tabla 4.19 Temperatura exterior superficie de muro.

Mes	Text sinEV (°C)	Tex conEV (°C)
ENE	24.3	20.2
FEB	25.7	20.8
MAR	26.9	20.5
ABR	24.2	17.3
MAY	21.1	20.5
JUN	17.0	16.6
JUL	17.2	16.7
AGO	18.6	17.9
SEP	20.7	19.8
OCT	20.6	16.4
NOV	21.8	17.3
DIC	23.4	19.6

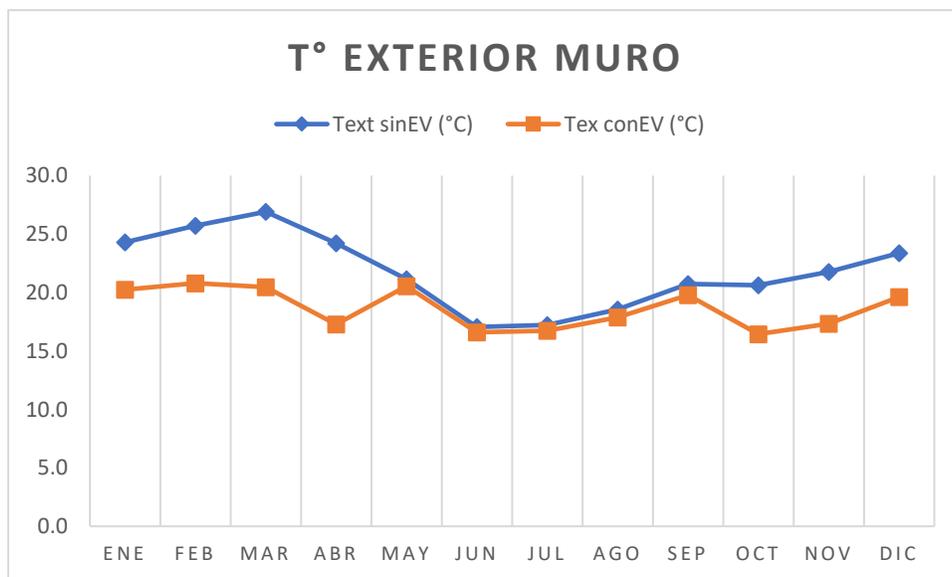


Figura 4.12 Gráfico de temperatura exterior superficie de muro.

En la tabla 4.20, se muestran la variación de la temperatura exterior de una superficie que corresponde al techo, sin envoltura vegetal y con envoltura vegetal. En la figura 4.13 se muestran estos resultados de forma gráfica.

El techo verde genera una disminución promedio de 1.5 °C de la temperatura de la superficie del techo del edificio.

Tabla 4.20 Temperatura exterior superficie de techo.

Mes	Text sinEV	Text conEV
ENE	28.8	24.9
FEB	27.6	23.2
MAR	24.2	21.8
ABR	18.5	18.9
MAY	13.5	15.3
JUN	9.6	11.1
JUL	9.9	12.7
AGO	12.7	13.5
SEP	17.2	17.9
OCT	21.5	17.4
NOV	26.0	22.2
DIC	28.8	21.5

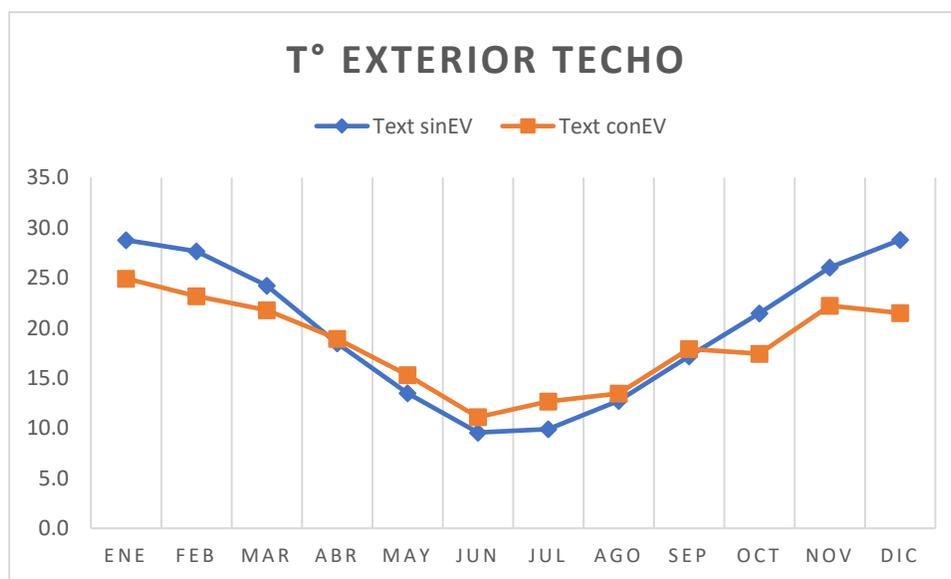


Figura 4.13 Gráfico de temperatura exterior superficie de techo.

Tanto en el muro como en el techo, se puede ver claramente la disminución de la temperatura al usarse envolvente vegetal en el edificio, principalmente durante los meses donde las plantas tienen sus hojas. En el caso del techo verde, al tener el efecto del sustrato a lo largo de todo el año, se observa un pequeño aumento de la temperatura entre los meses de abril y septiembre.

De varios estudios, analizados por Pérez (2017), obtuvo que, en climas seco y cálido, la temperatura del aire puede disminuir al nivel de los techos hasta 12.8 °C la media diaria, mientras que en el interior

del cañón la temperatura máxima se redujo 11.3 °C y la temperatura media diaria 9.1 °C. En clima húmedo, el resultado fue un descenso de la temperatura máxima de 8.4 °C. Además, una investigación en Toronto concluyó que el uso de techo verde reduce la temperatura ambiente entre 0.5 °C y 2 °C.

Mejoramiento de la calidad del aire

Las envolventes vegetales mejoran la calidad del aire en las ciudades actuando como filtros absorbiendo algunos contaminantes y reteniendo partículas en suspensión en el aire de las ciudades, reduce los gases de efecto invernadero como dióxido de carbono, monóxido de carbono y dióxido de nitrógeno (Estrella, 2018).

Al realizar la fotosíntesis, las plantas proporcionan O₂ y absorben CO₂, renovando el aire del entorno. Por otro lado, la vegetación también actúa sobre la contaminación, tanto porque en el sustrato o suelo que las mantiene se depositan partículas y metales pesados que son aprovechadas o metabolizadas por la microflora del suelo (hongos y bacterias), como porque sobre las mismas superficies foliares se precipitan esas partículas que la planta absorberá y fijará en sus tejidos, secuestrando así contaminantes como el plomo, el cadmio u otros metales pesados, que de otro modo permanecerían en suspensión en el aire (Navarro, 2013).

La capacidad de las envolventes vegetales para mejorar la calidad del aire depende en gran medida de las condiciones específicas del lugar. Para que los efectos en la calidad del aire de las ciudades sean perceptibles, se requieren políticas urbanas específicas que fomenten la aplicación generalizada de fachadas y cubiertas verdes (Olivieri, 2013).

Se calcula que una hectárea de vegetación típica puede absorber 7500 kg de CO₂ cada año (Navarro, 2013). Además, 1 m² de vegetación, pasto o maleza, remueve hasta 2 kg de material particulado, el que queda atrapado en su follaje (CDT, 2010).

Mejoramiento de la gestión de aguas lluvias

Las envolventes vegetales poseen un gran potencial en la gestión de las aguas lluvias. Este efecto es mayor en techos que en muros. La impermeabilización de los suelos artificiales en el entorno urbano es la principal razón del rápido escurrimiento del agua lluvia y de los altos picos en los hidrogramas registrados justo después de las lluvias. Los techos verdes pueden retener el agua lluvia a corto plazo, y dependiendo del drenaje pueden reducir la cantidad de agua lluvia que llega al sistema de drenaje urbano en las lluvias de baja intensidad (Olivieri, 2013).

Algunos techos verdes pueden incorporar un sistema de aprovechamiento de las aguas, aportando a los estanques de aguas grises con el fin de ser utilizadas en dicho sistema (CDT, 2010).

Una cubierta vegetal puede reducir hasta el 60 % de la escorrentía y hasta un 85 % de la evacuación de aguas durante las dos primeras horas de una lluvia intensa (CDT, 2010).

4.5.3 Economía

De los datos presentados en la sección 4.4.1 y 4.4.2, se tiene que el uso de envolvente vegetal en edificación tiene asociado una alta inversión inicial y de costos de mantención.

4.5.4 Regulación legal

Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones vigente (Decreto 47, 1992), la cual reglamenta la Ley General de Urbanismo y Construcciones, y regula el procedimiento administrativo, el proceso de planificación urbana, el proceso de urbanización, el proceso de construcción, y los estándares técnicos de diseño y de construcción exigibles en los dos últimos.

NCh3626:2020 Techos verdes – Terminología, clasificación y requisitos, esta norma define los requisitos y criterios para el diseño, construcción y mantención de un techo verde y aplica a cubiertas con una inclinación de hasta 15 % (equivalente a 8.5°) de edificios nuevos o existentes, públicos o

privados. Asimismo, identifica términos y conceptos relevantes y sus respectivas definiciones, haciendo referencia a la clasificación de techos verdes: extensivos, intensivos y semintensivos, a los requisitos de diseño, técnicos, sistemas modulares, requisitos de ejecución y mantención (MINVU, s.f.).

En la presentación de la norma NCH3626:2020, se señala como necesaria una futura modificación a la OGUC para que haga referencia a esta norma (MINVU, 2021).

En Chile, no existe norma para muros verdes

4.5.5 Sociedad

La vegetación genera alivio y contraste con el entorno altamente urbanizado en el que vivimos dentro de las ciudades, además de dar ocasión a los habitantes de tener más contacto con la naturaleza (Pérez, 2017).

La biofilia, que sugiere que los humanos sienten una afinidad innata por todo lo viviente, permite entender por qué este tipo de cubiertas ha mostrado tener efectos positivos en la salud de las personas, productividad de trabajadores y recuperación de pacientes en hospitales (Canales, 2014).

Las plantas pueden cumplir varias funciones, proporcionan espacios de recreo y disfrute, aislamiento, paisaje para la vida urbana, así como mejoras estéticas, paisajísticas, etc. Se ha probado que el contacto visual y físico con las plantas puede resultar beneficioso para la salud, ya que es capaz de disminuir estrés, mejora la recuperación de pacientes y dota a las personas de mayor resistencia ante contagio de enfermedades (Pérez, 2017)

4.6 Síntesis

En la tabla 4.21, se muestra la síntesis de impactos de los hechos en los tres capitales.

Tabla 4.21 Síntesis de Impactos en los tres capitales

	Capital natural	Capital humano y social	Capital manufacturado y financiero
Ambiental	(+) Potencial reducción islas de calor urbana. (+) Mejoramiento calidad del aire. (+) Mejoramiento gestión de aguas lluvias.		
Normativo			(+) Normativa para techos verdes (-) No existe normativa para muros verdes
Energía	(-/+) No se puede asegurar un ahorro energético, en casos puede ser hasta contraproducente.		(-/+) Ahorro o aumento energético se traduce en un ahorro o aumento de los costos a pagar en el uso de la edificación.
Económico			(-) Alta inversión inicial. (-) Costos de mantenimiento.
Social		(+) Uso de vegetación tiene efectos positivos en la salud de las personas	
Síntesis	(+) Potenciales beneficios medioambientales en el entorno urbano. (-/+) No se puede asegurar un ahorro energético en todos los casos.	(+) Uso de vegetación tiene efectos positivos en la salud de las personas.	(+) Normativa de techos verdes (-) No existe normativa para muros verdes (-) Alta inversión inicial y costos de mantenimiento.

4.7 Conclusión

Los resultados obtenidos de la simulación no muestran un gran ahorro energético al utilizar envolvente vegetal en edificios, incluso en algunos casos resulta contraproducente su utilización al aumentar la demanda de energía total, contrario a los resultados de algunos estudios mostrados en el capítulo 2. Esto se debe a que esos estudios mostraban los valores máximos de ahorros o solo de la temporada de enfriamiento. Tampoco se compara a los ahorros energéticos del edificio Consorcio que, si bien considera la demanda de energía total, es un edificio que se construyó en 1993 donde todavía no había reglamentación térmica en Chile. De los resultados de la simulación donde se obtenían beneficios, no supera el 3 % de disminución de demanda energética, lo que hace resultados más similares a los

obtenidos por ARUP (2016) donde habían identificado que se debía a factores como muros bien aislados y a la demanda de enfriamiento, situación similar a los edificios simulados, los cuales cumplen exigentes requisitos de aislación incluso más altos que los vigentes y los cuales resultaban en una baja demanda de enfriamiento en el caso base.

Se identificaron aspectos técnicos y los factores a considerar al momento de seleccionar un sistema de envolvente vegetal, junto con los costos promedios de construcción y de mantención de las diferentes envolventes vegetales.

La metodología simplificada de Ashby permitió realizar una síntesis de como la utilización de las envolventes vegetales impactan en el capital natural, humano y social, manufacturado y financiero, identificando como positivo principalmente los beneficios medioambientales y sociales, y como negativo los altos costos de inversión y mantención, y que no se puede asegurar un ahorro energético en los edificios.

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

El uso de envolvente vegetal en edificios no siempre puede asegurar un beneficio de ahorro energético. En efecto, para las condiciones chilenas analizadas, la simulación con el techo verde resulta en cambios prácticamente nulos en la demanda energética del edificio y el muro verde genera a través de su sombra una disminución de la temperatura del edificio, lo que provoca una disminución de la demanda de energía de enfriamiento, pero que a su vez provoca un aumento de la demanda de energía de calefacción, lo cual genera un cambio contraproducente en la mayoría de los casos al aumentar la demanda de energía total. Se obtuvo que un muro verde solo en la orientación norte generaba mejores resultados de demanda energética que en tres orientaciones (norte, oriente y poniente). Con el muro verde en las tres orientaciones, el caso del edificio residencial ubicado en Santiago es el único que resultó en una pequeña disminución de 0.21 % de la demanda energética. Con el muro verde solo en la orientación norte, el edificio residencial tuvo una disminución de la demanda energética de 0.44 %, 2.34 %, 0.68 %, 0.37 % para La Serena, Santiago, Concepción y Temuco respectivamente, siendo el ubicado en Santiago el que obtuvo el mayor ahorro energético. En el caso de los edificios de oficina, ninguno de los casos con envolvente vegetal logró un ahorro energético.

Los principales beneficios medioambientales y sociales asociados al uso de envolvente vegetal en edificios son la reducción del efecto isla de calor urbana, mejoramiento de la calidad del aire y mejoramiento de la gestión de aguas lluvias, son importantes para el mejoramiento de la vida urbana presente y futura, lo que lo hace una buena alternativa a considerar en proyectos de edificación. El muro verde puede llegar a reducir en promedio 5 °C la temperatura del muro del edificio y el techo verde puede llegar a reducir en 1.5 °C la temperatura del techo, según los datos obtenidos de la simulación para el caso del edificio residencial en Santiago, mostrando la potencialidad de la envolvente vegetal para reducir el efecto isla de calor urbana.

Los edificios simulados cumplen requisitos de aislación térmica superiores a los exigidos por la normativa vigente, esta es una de las principales razones que podría explicar porque no resultaron mayores ahorros de demanda energética, ya que como indicaron otros estudios las envolventes vegetales pueden ser más efectivas en edificios pobremente aislados.

Se recomienda para futuros estudios analizar edificios con otros sistemas de envolvente vegetal y simular edificios con normativa térmica antigua, para conocer si las envolventes vegetales en estos casos resultan más beneficiosas en términos de ahorro de demanda energética, que los analizados en este trabajo.

REFERENCIAS

- ArchDaily. (2009). *Edificio Consorcio Santiago / Enrique Browne + Borja Huidobro*.
<https://www.archdaily.cl/cl/02-14392/edificio-consorcio-sede-santiago-enrique-browne-borja-huidobro>
- ARQA. (2011). *Edificio Consorcio Santiago, 14 años después*.
<https://arqa.com/arquitectura/sustentable/edificio-consorcio-santiago-14-anos-despues.html>
- ARUP. (2016). *Cities Alive: Envolvertes vegetales en edificios*. <https://www.arup.com/es-es/perspectives/publications/research/section/cities-alive-green-building-envelope>
- Ashby, M. (2016). *Materials and Sustainable Development*. Butterworth-Heinemann.
<https://doi.org/10.1016/C2014-0-01670-X>
- Beato, M. (2019). *Evaluación del impacto de estrategias NBS en el consumo energético de edificios. Aplicación a la ciudad de Valencia*. [Tesis de máster, Universitat Politècnica de València].
<http://hdl.handle.net/10251/127734>
- Canales, M. (2014). *Efectos del uso de techos y fachadas vegetales en el comportamiento térmico de edificios*. [Tesis Pregrado, Universidad de Chile].
<http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/130298>
- Corporación del Desarrollo Tecnológico - CDT. (2010). *Recomendaciones Técnicas para Proyectos de Cubiertas Vegetales*. https://www.cdt.cl/?post_type=dlm_download&p=76406
- Decreto 47 de 1992 [Ministerio de Vivienda y Urbanismo]. Fija nuevo texto de la Ordenanza General de la Ley General de Urbanismo y Construcciones. 16 de abril de 1992 (Modificado el 28 de febrero del 2022). <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=8201&idVersion=2022-02-28>

- Decreto 494 de 2021 [Municipalidad de Concepción]. Promulga la 15ª modificación del plan regulador de la comuna de Concepción. 25 de junio de 2021. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1162293>
- Decreto 1302 de 2020 [Municipalidad de La Serena]. Deroga instrumentos que indica y promulga plan regulador comunal de La Serena. 10 de diciembre de 2020. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1153789>
- Decreto 2181 de 2012 [Municipalidad de Temuco]. Aprueba modificación a planos reguladores de Temuco y Labranza, vía enmiendas y plano seccional Las Encinas, y tramo que indica. 30 de mayo de 2012. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1041596>
- Decreto 6847 de 2021 [Municipalidad de Santiago]. Promulga modificación del plan regulador comunal de Santiago. 24 de noviembre de 2021. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1169355>
- EnergyPlus. (2022). Energyplus.net. <https://energyplus.net/>
- Estrella, M. (2018). *Propuesta de un jardín vertical a partir de datos de calidad del aire* [Tesis de pregrado, Universidad de las Américas, Quito]. <http://dspace.udla.edu.ec/handle/33000/9997>
- Garcia, A. (2018). *¿Por qué usamos Open Studio para la simulación energética?* Zeroconsulting.com. <https://blog.zeroconsulting.com/open-studio>
- Guevara, W. (2020). *Proyecto empresa jardín vertical*. [Trabajo de Grado, Universidad Católica de Colombia]. <https://hdl.handle.net/10983/24955>
- Gunawardena, K., y Steemers, K. (2019). Living walls in indoor environments. *Building and Environment*, 148, 478–487. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.11.014>

- Instituto de la Construcción. (2014). *Manual de Evaluación y Calificación*.
https://certificacionsustentable.cl/wp-content/uploads/2020/03/27310_Manual1_EvaluacionCalificacion_v1.1_2014.05.28.pdf
- Instituto Nacional de Estadísticas. (s.f.). Estimación y proyecciones 2002-2035 base 2017 regiones área infografía. <https://www.ine.cl/estadisticas/sociales/demografia-y-vitales/proyecciones-de-poblacion>
- Instituto Nacional de Normalización. (2007). *Acondicionamiento térmico – Envoltura térmica de edificios – Cálculo de resistencias y transmitancias térmicas* (NCh 853).
<http://normastecnicas.minvu.cl/>
- JardineriaOn. (2020). *Sedum spurium, una suculenta perfecta para tener en maceta*.
<https://www.jardineriaon.com/sedum-spurium.html>
- Manso, M., y Castro-Gomes, J. (2015). Green wall systems: A review of their characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 863–871.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.203>
- Manso, M., Teotónio, I., Silva, C. M., y Cruz, C. O. (2021). Green roof and green wall benefits and costs: A review of the quantitative evidence. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110111. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110111>
- Ministerio de Energía. (2020). *Eficiencia Energética en Edificios Públicos: Estándares, programas relacionados y proyectos en la región de Aysén*.
https://www.energia.gob.cl/sites/default/files/01._eficiencia_energetica_en_edificios_publicos_y_programas_relacionados.pdf
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo - MINVU. (2018). *Estándares de Construcción Sustentable para Viviendas, Tomo II: Energía. División Técnica de Estudio y Fomento Habitacional - Ditec, Minvu*.
<https://csustentable.minvu.gob.cl/wp->

content/uploads/2018/03/EST%C3%81NDARES-DE-CONSTRUCCI%C3%93N-SUSTENTABLE-PARA-VIVIENDAS-DE-CHILE-TOMO-II-ENERGIA.pdf

Ministerio de Vivienda y Urbanismo – MINVU. (2021). *Lanzamiento NCh 3626:2020 TECHOS VERDES Terminología, clasificación y requisitos*. <https://www.minvu.gob.cl/wp-content/uploads/2021/04/PPT-Techos-Verdes.pdf>

Ministerio de Vivienda y Urbanismo – MINVU. (s.f.). *Infraestructura verde y espacios públicos sustentables*. <https://www.minvu.gob.cl/ditec/infraestructura-verde-y-espacios-publicos-sustentables/>

Navarro, J. (2013). *Los jardines verticales en la edificación*. [Tesis de máster, Universitat Politècnica de València]. <http://hdl.handle.net/10251/33814>.

Olivieri, F. (2013). *Caracterización experimental y modelo predictivo del comportamiento térmico de una fachada vegetal*. [Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid]. <https://oa.upm.es/22384/>

OpenStudio. (2022). *Openstudio.net*. <https://openstudio.net/>

Pereira, J. (2016). *Fachadas vegetales: análisis del impacto medioambiental y aplicaciones*. [Trabajo fin de grado, Universidade da Coruña]. <http://hdl.handle.net/2183/16966>

Pérez, N. (2017). *Respuesta térmica de edificaciones con envolventes vegetales: cubiertas verdes y fachadas verdes*. [Tesis de Doctorado, Universidade de São Paulo] <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-08082017-165024/en.php>

Plantas & Jardín. (2013). *Techos Verdes, cubiertas vegetales, ecológicas y sustentables*. <https://plantasyjardin.com/2013/10/techos-verdes-cubiertas-vegetales-ecologicas-y-sustentables/>

Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá. (2021). *Catálogo de especies vegetales Techos verdes y jardines verticales.*

<https://ambientebogota.gov.co/documents/10184/411743/CATALOGO+DE+ESPECIES+VEGETALES+2021.pdf/1ff84016-3884-4ab9-a9d9-879e4e7a7ce7>

Seguel, V. (2018). *Metodología de evaluación para la implementación de fachada verde doble piel en edificios.* [Memoria de Título, Universidad Técnica Federico Santa María].

<https://hdl.handle.net/11673/47060>

SketchUp. (2022). SketchUp. <https://www.sketchup.com/>

Revista Vivienda. (2015). *La pared vegetal, eficaz aislante acústico.*

<http://www.revistavivienda.com.ar/destacadas/la-pared-vegetal-eficaz-aislante-acustico>

Water Pennsylvania Conservancy. (s.f.). *Downtown Pittsburgh Greening.*

<https://waterlandlife.org/gardens-greenspace/downtown-pittsburgh-greening/#greening>

ANEXOS

ANEXO 1.1 CONTRIBUCIÓN A LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) constituyen un llamamiento universal a la acción para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo. Seleccione a cuál o cuáles de los 17 ODS contribuye su trabajo de Memoria de Título:

- ODS-1 : Fin de la pobreza.
- ODS-2 : Hambre cero.
- ODS-3 : Salud y bienestar.
- ODS-4 : Educación de calidad.
- ODS-5 : Igualdad de género.
- ODS-6 : Agua limpia y saneamiento.
- ODS-7 : Energía asequible y no contaminante.
- ODS-8 : Trabajo decente y crecimiento económico.
- ODS-9 : Industria, innovación e infraestructura.
- ODS-10: Reducción de las desigualdades.
- ODS-11: Ciudades y comunidades sostenibles.
- ODS-12: Producción y consumo responsables.
- ODS-13: Acción por el clima.
- ODS-14: Vida Submarina.
- ODS-15: Vida de ecosistemas terrestres.
- ODS-16: Paz, justicia e instituciones sólidas.
- ODS-17: Alianzas para lograr los objetivos.

Vinculación
<p>El tema de la memoria de título es el análisis técnico y ambiental de la utilización de envoltente vegetal en edificios, lo cual está directamente vinculado al ODS-11, ya que una de sus metas tiene relación con el uso eficiente de los recursos y la mitigación del cambio climático, y este trabajo nace de la motivación de buscar revertir la tendencia del aumento del consumo de energía y de CO2 del sector edificación en Chile. Por lo que se busca conocer cómo afecta la utilización de envoltentes vegetales en las demandas de energía de los edificios y principalmente sus impactos en el capital natural, humano y manufacturado, lo que permitirá saber tanto los aspectos positivos como negativos de su utilización, y tomar mejores decisiones en futuros proyectos de edificación y si su implementación va o no en mejora a la sostenibilidad de las ciudades y sus comunidades.</p>

ANEXO 3.1 DATOS DE ENTRADA PARA SIMULACIÓN

Anexo 3.1.1 Archivos climáticos

Se utilizan los archivos climáticos creados exclusivamente para uso en simulaciones, disponibles de manera gratuita en csustentable.minvu.gob.cl (MINVU, 2018)

Anexo 3.1.2 Zonificación de recintos interiores del modelo energético

La representación geométrica de la vivienda se realizará a través de una zona interior única, sin particiones interiores. (MINVU, 2018)

Anexo 3.1.3 Cargas internas asociadas a iluminación

Se consideran 1,5 W/m² de potencia instalada dentro de la vivienda y 5 W/m² en pasillos, para el caso del edificio residencial. Se crea calendarios de horarios según región, para distintos meses del año, como se indica en la tabla A.3.1, para definir el horario de encendido y apagado de luces (MINVU, 2018).

Tabla A.3. 1 Horarios de encendido de luces al interior de la vivienda.

Región	Horario desde - hasta				
	ENE – FEB	MAR - ABR	MAY - AGO	SEP – OCT	NOV - DIC
	GMT-3	GMT-3	GMT-4	GMT-3	GMT-3
Coquimbo	21-22	7-8 / 20-22	7-8 / 18-22	7-8 / 20-22	21-22
Metropolitana	21-22	7-8 / 20-22	7-8 / 18-22	7-8 / 20-22	21-22
Biobío	21-22	7-8 / 20-22	7-8 / 18-22	7-8 / 20-22	21-22
Araucanía	21-22	7-8 / 20-22	7-8 / 18-22	7-8 / 20-22	21-22

Fuente: MINVU (2018)

Se consideran 12 W/m² de potencia instalada en oficinas y 5 W/m² en pasillos, para el caso del edificio de oficinas. Se crean calendarios de horarios, como se indica en la tabla A.3.2, para definir el horario de encendido y apagado de luces (Instituto de la Construcción, 2014).

Tabla A.3. 2 Horarios de encendido de luces al interior de edificio de oficinas.

Recinto	Régimen	
	Horario lunes-viernes	Vacaciones
Oficinas	8-18	Tipo A
Pasillos	8-18	Tipo A
Vacaciones tipo A: 1 al 21 de febrero		

Fuente: Instituto de la Construcción (2014)

Anexo 3.1.4 Cargas internas asociadas a equipos eléctricos

No se consideran, para el caso del edificio residencial. (MINVU, 2018).

Se consideran 15.3 W/m² en oficinas y 0 W/m² en pasillos, para el caso del edificio de oficinas. Se crean calendarios de horarios, como se indica en la tabla A.3.3, para definir el horario de encendido y apagado de equipos eléctricos. (Instituto de la Construcción, 2014).

Tabla A.3. 3 Horarios de encendido de equipos eléctricos al interior de edificio de oficinas.

Recinto	Régimen	
	Horario lunes-viernes	Vacaciones
Oficinas	8-18	Tipo A
Pasillos	8-18	Tipo A
Vacaciones tipo A: 1 al 21 de febrero		

Fuente: Instituto de la Construcción (2014)

Anexo 3.1.5 Cargas internas asociadas a ocupantes

Para el caso del edificio residencial, se considera una ocupación de 4 personas en cada vivienda, cuya fracción de ocupación durante el día corresponde al indicado en la tabla A.3.4. Dichas personas

proporcionas una carga sensible de 98.4 W durante el día (7 a 22 horas) y 82 W durante la noche (22 a 7 horas) (MINVU, 2018).

Tabla A.3. 4 Fracción de ocupación durante el día en la vivienda.

Horario desde - hasta	Fracción de ocupación
0-8	1
8-9	0.9
9-10	0.4
10-17	0.3
17-18	0.5
18-22	0.9
22-24	1

Fuente: MINVU (2018)

Para el caso del edificio de oficinas, se utiliza la tasa de ocupación y carga interna indicada en la tabla A.3.5.

Tabla A.3. 5 Carga interna asociada a ocupantes en edificio de oficinas.

Recintos	Tasa de ocupación		Carga interna	
	pers/ 100m2	m2/pers	W/pers	Personas (W/m2)
Oficinas	10	10.0	82	8.20
Pasillos	0	0	-	0

Fuente: Instituto de la Construcción (2014)

Anexo 3.1.6 Cálculo de demanda térmica

El cálculo de demanda energética para enfriamiento y calefacción deberá realizarse considerando los límites de temperatura mensuales de las tablas A.3.6 y A.3.7, respectivamente. La demanda térmica será calculada para alcanzar los niveles de confort de manera permanente, independiente del horario real de uso del edificio (MINVU, 2018).

Tabla A.3. 6 Temperaturas mensuales para cálculo de demanda de calefacción.

Límites para calefacción (Tmin)				
Zona térmica	C	D	E	F
ENE	21.1	21.6	20.9	20.9
FEB	21.0	21.5	20.6	20.8
MAR	20.7	20.9	20.2	20.3
ABR	20.3	20.0	19.6	19.5
MAY	19.9	19.2	19.2	19.0
JUN	19.6	18.5	18.7	18.4
JUL	19.4	18.6	18.0	18.3
AGO	19.5	18.8	18.6	18.5
SEP	19.7	19.4	19.0	18.9
OCT	20.1	20.1	19.5	19.4
NOV	20.5	20.6	20.1	19.9
DIC	20.9	21.3	20.6	20.5

Fuente: MINVU (2018)

Tabla A.3. 7 Temperaturas mensuales para cálculo de demanda de enfriamiento.

Límites para enfriamiento (Tmax)				
Zona térmica	C	D	E	F
ENE	26.1	26.6	25.9	25.9
FEB	26.0	26.5	25.6	25.8
MAR	25.7	25.9	25.2	25.3
ABR	25.3	25.0	24.6	24.5
MAY	24.9	24.2	24.2	24.0
JUN	24.6	23.5	23.7	23.4
JUL	24.4	23.6	23.0	23.3
AGO	24.5	23.8	23.6	23.5
SEP	24.7	24.4	24.0	23.9
OCT	25.1	25.1	24.5	24.4
NOV	25.5	25.6	25.1	24.9
DIC	25.9	26.3	25.6	25.5

Fuente: MINVU (2018)

Anexo 3.1.7 Construcciones y materiales

Las soluciones constructivas deben cumplir los valores indicados en la tabla A.3.8.

Tabla A.3. 8 Valores de transmitancia térmica U [W/(m²K)] y resistencia térmica (R100)

Zona térmica	Techos	Muros	Pisos ventilados	Pisos sobre terreno -R100 [(m ² K)/W]*100	Puertas
C	0.47	0.8	0.87	45	1.7
D	0.38	0.8	0.7	45	1.7
E	0.33	0.6	0.6	45	1.7
F	0.28	0.45	0.5	91	1.7

Fuente: MINVU (2018)

Los materiales de construcción utilizados en los modelos son los siguientes.

Tabla A.3. 9 Características térmicas de los materiales.

Material	Densidad (kg/m ³)	Conductividad térmica (W/m*K)	Calor específico (J/kg*K)
Hormigón armado (normal)	2400	1.63	840
Poliestireno expandido	20	0.0384	1200
Poliuretano expandido	40	0.025	1260
Enlucido de yeso	1000	0.44	837
Mortero de cemento	2000	1.4	920

Fuente: MINVU (2018)

A continuación, se presentan las soluciones constructivas utilizadas en los modelos según la zona térmica correspondiente. Se calculó la transmitancia térmica (U), según la norma NCh853 (Instituto Nacional de Normalización, 2007).

Tabla A.3. 10 Solución constructiva para techo según zona térmica.

Techo	Zona térmica	Conductividad térmica [W/(m*K)]	Espesor (m)	Resistencia térmica [(m2K)/W]
Capa de aire superficial interior	C, D, E, F	-	-	0.09
Enlucido de yeso	C, D, E, F	0.44	0.02	0.045
Hormigón armado (normal)	C, D, E, F	1.63	0.15	0.092
Poliuretano expandido (40kg/m3)	C	0.025	0.05	2
	D		0.06	2.4
	E		0.07	2.8
	F		0.09	3.6
Capa de aire superficial exterior	C, D, E, F	-	-	0.05

Tabla A.3. 11 Resistencia y transmitancia térmicas total para techo.

Zona térmica	Resistencia térmica [(m2K)/W]	Transmitancia térmica (U) [W/(m2*K)]
C	2.28	0.44
D	2.67	0.37
E	3.07	0.32
F	3.87	0.25

Tabla A.3. 12 Solución constructiva para muro exterior según zona térmica.

Muro Exterior	Zona térmica	Conductividad térmica [W/(m*K)]	Espesor (m)	Resistencia térmica [(m2K)/W]
Capa de aire superficial interior	C, D, E, F	-	-	0.12
Hormigón armado (normal)	C, D, E, F	1.63	0.2	1.22
Poliestireno expandido (20kg/m3)	C	0.0384	0.04	1.04
	D		0.04	1.04
	E		0.06	1.56
	F		0.08	2.08
Mortero de cemento	C, D, E, F	1.4	0.01	0.007
Capa de aire superficial exterior	C, D, E, F	-	-	0.05

Tabla A.3. 13 Resistencia y transmitancia térmica total para muro exterior.

Zona térmica	Resistencia térmica [(m ² K)/W]	Transmitancia térmica (U) [W/(m ² *K)]
C	0.74	1.34
D	0.74	1.34
E	0.53	1.86
F	0.41	2.38

Tabla A.3. 14 Solución constructiva para piso exterior según zona térmica.

Piso exterior	Zona térmica	Conductividad térmica [W/(m*K)]	Espesor (m)	Resistencia térmica [(m ² K)/W]
Capa de aire superficial interior	C, D, E, F	-	-	0.17
Hormigón armado (normal)	C, D, E, F	1.63	0.12	0.073
Poliestireno expandido (20kg/m ³)	C	0.0384	0.04	1.04
	D		0.05	1.30
	E		0.06	1.56
	F		0.07	1.82
Capa de aire superficial exterior	C, D, E, F	-	-	0.05

Tabla A.3. 15 Resistencia y transmitancia térmica total para piso exterior.

Zona térmica	Resistencia térmica [(m ² K)/W]	Transmitancia térmica (U) [W/(m ² *K)]
C	1.33	0.74
D	1.59	0.62
E	1.85	0.53
F	2.11	0.47

Las soluciones constructivas para pisos y muros interiores son las siguientes, las cuales no deben cumplir con requisito térmico.

Tabla A.3. 16 Solución constructiva para piso interior.

Piso interior	Zona térmica	Espesor (m)
Hormigón armado (normal)	C, D, E, F	0.15

Tabla A.3. 17 Solución constructiva para muro interior.

Muro interior	Zona térmica	Espesor (m)
Hormigón armado (normal)	C, D, E, F	0.15

Para la puerta exterior, se utilizó la solución asignada por defecto por el programa ya que se comprueba que cumple con el requisito térmico indicado en la tabla A.3.1.8.

Tabla A.3. 18 Solución constructiva para puerta exterior.

Puerta exterior	Zona térmica	Conductividad térmica [W/(m*K)]	Espesor (m)	Resistencia térmica [(m2K)/W]
F08 <i>Metal Surface</i>	C, D, E, F	45.28	0.0008	0.000017
I01 <i>25mm Insulation board</i>	C, D, E, F	0.03	0.0254	0.846
Resistencia térmica total [(m2K)/W]				0.846
Transmitancia térmica total [W/(m2*K)]				1.18

Para las ventanas exteriores, se utilizó las características indicadas en el manual de construcción sustentable (MINVU, 2018), correspondientes a ventana de doble vidriado hermético (DVH).

Tabla A.3. 19 Características térmicas de ventana de doble vidriado hermético (DVH)

Variable	Valor
Transmitancia térmica (U)	3.58 W/m2*K
Factor solar (g)	0.64
Coefficiente de sombra (SC)	0.74

Fuente: MINVU (2018)

El cumplimiento de los porcentajes de ventanas se presenta en el Anexo 3.2.

Anexo 3.1.8 Infiltraciones y ventilación higiénica

Se asume un intercambio constante de aire de 1 renovación de aire por hora (RAH), valor que asume infiltraciones por rendijas y ventilación por concepto de salubridad (MINVU, 2018).

Anexo 3.1.9 Ventilación por medio de apertura de ventanas o puertas

La ventilación natural para reducción de temperatura, por concepto de apertura de ventanas o puertas, se configura como una tasa de 3 RAH, cuando se cumplen las siguientes condiciones:

- Entre 22 y 6 horas.
- Cuando la temperatura interior supere el límite de enfriamiento establecido por la Tabla A.3.7.
- La temperatura exterior supere los 15 °C.

Dichos valores fueron establecidos para emular condiciones de ventilación nocturna. (MINVU, 2018)

Además, para el caso del edificio de oficinas, se consideran las tasas de ventilación de la tabla A.3.20 en el horario indicado en la tabla A.3.21.

Tabla A.3. 20 Tasas de ventilación

Recintos	Tasa de ventilación	
	L/s persona	L/s m ²
Oficinas	2.5	0.3
Pasillos	0	0.3

Fuente: Instituto de la Construcción (2014)

Tabla A.3. 21 Horarios de tasas de ventilación

Recinto	Régimen	
	Horario lunes-viernes	Vacaciones
Oficinas	8-18	Tipo A
Pasillos	8-18	Tipo A
Vacaciones tipo A: 1 al 21 de febrero		

Fuente: Instituto de la Construcción (2014)

ANEXO 3.2 PORCENTAJE DE VENTANAS POR ORIENTACIÓN

La sumatoria de fachadas vidriadas oriente y poniente debe corresponder como máximo a un 50 % de la sumatoria de las superficies vidriadas norte. Para fachadas sur, se deberá cumplir con las superficies máximas por zona térmica, indicadas en la tabla A.3.22.

Tabla A.3. 22 Porcentajes máximos de superficie vidriada por orientación.

Zona térmica	N	S	E-0
C	50 %	50 %	40 %
D	50 %	40 %	30 %
E	50 %	40 %	30 %
F	50 %	35 %	25 %

Fuente: MINVU (2018)

Anexo 3.2.1 Superficie vidriada del edificio residencial.

Tabla A.3. 23 Superficie vidriada del edificio residencial.

Orientación	Superficie Total (m2)	Superficie vidriada (m2)	%V
Norte	630	299.25	47.5
Sur	630	189	30
Este	390	72	18.4
Oeste	390	72	18.4
Total	2040	533.25	26.1

Se cumple que la sumatoria de fachadas vidriadas oriente y poniente debe corresponder como máximo a un 50 % de la sumatoria de las superficies vidriadas norte ($144 \leq 149.63$).

Además, se cumplen los porcentajes máximos de superficie vidriadas por orientación de la tabla A.3.22 para todas las zonas térmicas en estudio.

Anexo 3.2.2 Superficie vidriada del edificio de oficinas**Tabla A.3. 24 Superficie vidriada del edificio de oficinas.**

Orientación	Superficie Total (m2)	Superficie vidriada (m2)	%V
Norte	1020	483.84	47.4
Sur	1020	403.2	39.5
Este	354	76.8	21.6
Oeste	354	76.8	21.6
Total	2748	1040.64	37.9

Se cumple que la sumatoria de fachadas vidriadas oriente y poniente debe corresponder como máximo a un 50 % de la sumatoria de las superficies vidriadas norte ($153.6 \leq 241.92$).

Además, se cumplen los porcentajes máximos de superficie vidriadas por orientación de la tabla A.3.22 para todas las zonas térmicas en estudio.

ANEXO 3.3 DEMANDA DE RIEGO

Cálculo de coeficiente de paisajismo (KL) para cada sector de paisajismo:

$$KL = Ks * Kd * Kmc$$

Donde: Ks: factor de especie

Kd: factor de densidad

Kmc: facto de microclima

Tabla A.3. 25 Factores de especie, densidad y microclima por tipo de vegetación

Tipo de vegetación	Factor de especie (Ks)			Factor de densidad (Kd)			Factor de microclima (Kmc)		
	Alto	Medio (ref)	Bajo	Alto	Medio (ref)	Bajo	Alto	Medio (ref)	Bajo
Arbustos, trepadoras y crasas	0.7	0.5	0.2	1.1	1	0.5	1.3	1	0.5
Tapizantes, cubresuelos y herbáceas	0.7	0.5	0.3	1.1	1	0.5	1.3	1	0.5
Césped	0.8	0.7	0.6	1	1	1	1.2	1	0.8

Fuente: Instituto de la Construcción (2014)

Para el cálculo del coeficiente de paisajismo referencial, se deben utilizar los valores indicados en las columnas Medio de cada uno de los factores (Ks, Kd y Kmc), salvo que se justifique el reemplazo de dichos valores. En este trabajo se utilizan valores medio para los factores de especie y de densidad, y se utilizará valor alto para el factor de microclima que representa de mejor manera el entorno urbano, ya que este corresponde a Influencia de fuentes de calor externo (vehículos, edificios o elevado uso de pavimentos).

Cálculo de la evapotranspiración (ETL) para cada sector de paisajismo:

$$ETL (mm) = ETO (mm) * KL$$

Donde: ETO (mm): evapotranspiración local en el mes más caluroso del año.

KL: coeficiente de paisajismo.

Tabla A.3. 26 Precipitaciones y evapotranspiración por localidad.

Localidad	PA Precip. Anual (mm/año)	ETO Evapotranspiración (mm/año)
La Serena	78	185
Santiago	312.5	210
Concepción	1110	141
Temuco	1157	171

Fuente: Instituto de la Construcción (2014)

Cálculo de agua demandada para riego (AD) para cada sector de paisajismo:

$$AD = \left(\text{superficie sector de paisajismo (m}^2\text{)} * \frac{ETL \text{ (mm)}}{IE} \right) * CE$$

Donde: Superficie sector de paisajismo (m²): este valor deberá ser igual para el proyecto propuesto y el de referencia.

ETL (mm): evapotranspiración del sector de paisajismo.

IE: factor de eficiencia del sistema de riego. (Tabla A.3. 27)

CE: factor de controlador de riego. Si no se incluye, C=1. A menor CE, menor demanda de agua.

Tabla A.3. 27 Eficiencia de sistema de riego

Método de riego	Factor
Riego por manguera (eficiencia de referencia)	0.5
Aspersión (regador de impacto)	0.75
Aspersión (boquilla fija y rotores)	0.8
Aspersión (rotores MP rotador)	0.85
Microjet y micro-aspersores	0.85
Goteo	0.9

Fuente: Instituto de la Construcción (2014)

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA
RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO

Departamento : Departamento de Ingeniería Civil
Carrera : Ingeniería Civil
Nombre del memorista : Paola Francisca Jiménez Ruiz
Título de la memoria : Análisis técnico y ambiental de la utilización de envolvente vegetal en edificios
Fecha de la presentación oral : 3 0 / 0 9 / 2 0 2 2

Profesor(es) Guía : Mauricio Pradena
Profesor(es) Revisor(es) : Alex Schwarz
Concepto :
Calificación :

Resumen

En Chile, existe un alto consumo de energía asociado a la operación de los edificios, el cual aumenta cerca de 1 % cada año, junto con el aumento de 2 % de las emisiones de CO₂ en el sector de edificación. Debido a los compromisos del país contra el cambio climático, es necesario revertir esta tendencia. Una solución asociada a la eficiencia energética es la utilización de envolventes vegetales, las cuales además tienen beneficios en el ambiente edificado y en el bienestar de las personas.

El objetivo de este trabajo es analizar técnica y ambientalmente la utilización de envolvente vegetal en edificios bajo condiciones climáticas chilenas. Para esto, se realizó una simulación dinámica para determinar las demandas energo-térmicas de un edificio residencial y uno de oficinas, ubicados en cuatro ciudades chilenas. Se determinaron aspectos técnicos, costo de implementación y operación de los sistemas de envolvente vegetal. Por último, se determinaron los impactos en el capital natural, humano y social, y manufacturado y financiero.

En la mayoría de los casos se obtuvieron cambios contraproducentes, ya que aumentaba la demanda de energía anual con la envolvente vegetal. De los impactos a los tres capitales, se identificaron como positivo los beneficios medioambientales y sociales, y como negativo los altos costos de inversión y mantención de los sistemas de envolvente vegetal.