

UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**EFFECTOS DEL USO DE TECHOS Y FACHADAS VEGETALES EN EL
COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE EDIFICIOS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

MICHEL IGNACIO CANALES GÁLVEZ

PROFESOR GUÍA:

GABRIEL RODRÍGUEZ JAQUE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

MIGUEL BUSTAMANTE SEPÚLVEDA

DAVID CAMPUSANO BROWN

SANTIAGO DE CHILE

2014

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil
POR: Michel Ignacio Canales Gálvez
FECHA: 01/10/2014
PROFESOR GUÍA: Gabriel Rodríguez Jaque

EFFECTOS DEL USO DE TECHOS Y FACHADAS VEGETALES EN EL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE EDIFICIOS

Mediante la realización de este trabajo de título se ha buscado estimar los aportes en la aislación térmica que pueden llegar a tener las cubiertas vegetales; techos y fachadas, lo que se realizó con ensayos de laboratorio para medir la conductividad de los sustratos y mediante modelación computacional para incluir los efectos que son complejos de considerar.

El objetivo general de esta memoria es aportar al conocimiento sobre estrategias de edificación sustentable, mostrando que los techos y fachadas vegetales son una opción viable en Chile y que actualmente puede ser ejecutada sin mayores inconvenientes.

Para estudiar y medir la conductividad térmica del sustrato, se han realizado ensayos según la norma chilena NCh850-2008 a distintas mezclas, preparadas en base a la revisión bibliográfica y contactos personales. Gracias a estudios previos y los valores que se entregan en la norma NCh853-2007, fue posible hacer una extrapolación de los resultados obtenidos en seco, congruentes con lo visto en la literatura.

La modelación computacional permite considerar los efectos de la capa vegetal, que representan gran parte del aporte a la aislación que provee el techo verde a la envolvente del edificio. Se observaron mejoras en el desempeño energético de una casa que alcanzan valores para la condición de verano sobre el 20%. En el caso del edificio, las mejoras fueron observadas casi únicamente en el último piso, alcanzado valores que llegan al 27% en dicho nivel, por lo que para ambos casos, sus efectos son considerablemente mayores durante la época estival.

El análisis de costos permite concluir que por la gran cantidad de beneficios del uso de techos y fachadas verdes difíciles de llevar a valores monetarios y por lo complicado de replicar los parámetros de diseño de un proyecto a otro, un balance económico que solo considera la inversión inicial, es insuficiente.

Finalmente, se debe destacar que más allá del ahorro energético en climatización que pueda generar el uso de cubiertas vegetales su mayor importancia recae en sus beneficios medioambientales; aumentan la superficie de áreas verdes, contribuyen a disminuir la contaminación y purificar el aire, reducen el efecto isla de calor en las urbes, contribuyen a la biodiversidad y mejoran el manejo de las escorrentías de aguas lluvias. Además, han mostrado ser buenos aislantes acústicos, aumentan la plusvalía de los edificios y mejoran la estética de las ciudades. Sus beneficios abarcan una zona mucho más global que el lugar donde son instalados, ayudando a construir entornos más saludables, ciudades más prósperas, confortables y sostenibles para las futuras generaciones.

A mi papá y mamá... a ellos les debo todo lo que soy.

A mis hermanas, que han crecido conmigo y me enseñan cada día. A mis abuelos, que me han enseñado a vivir.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a mi profesor guía, Gabriel Rodríguez, por su ayuda y apoyo durante el trabajo. A mi profesor Co-guía, Miguel Bustamante, por su excelente disposición y consejos. Gracias también a Esteban Ruedlinger por su apoyo durante la fase experimental de este trabajo. Gracias a María Fernanda Gómez, por guiarme cuando estaba comenzando, por su ayuda, apoyo y por el interés que ha mostrado en mi trabajo.

Agradezco a todos mis amigos de la U, mis compañeros de la pecera de Civil, mis amigos Lastarrinos y mis amigos de la vida, quienes me han apoyado siempre y han hecho que esta etapa de mi formación fuera feliz.

Infinitas gracias a mi polola Constanza. Me has apoyado desde que me conoces, me has dado ánimo cuando lo necesitaba, me has acompañado en todos los momentos y has hecho que todos los días contigo sean una alegría.

Finalmente agradezco a mi familia, mis abuelos Memo y Norma, que desde pequeño me han enseñado a disfrutar de las cosas simples de la vida. A mis hermanas, que me han soportado y han crecido conmigo durante largos años. Y a mis padres, que han formado en mi la persona que ahora soy y continúan enseñándome cada día.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo General	2
1.2. Objetivos específicos.....	2
CAPITULO 2: ANTECEDENTES	3
2.1. Cubiertas vegetales	3
Reseña histórica	3
2.2. TECHOS VERDES	4
2.2.1. Clasificación	4
2.2.2. Componentes	5
2.3. FACHADAS VEGETALES	7
2.3.1. Clasificación	7
2.4. Transmisión de calor	8
2.5. Conductividad térmica.....	9
2.6. Sensación térmica y confort habitacional	10
2.7. Balance térmico de un edificio	12
CAPÍTULO 3: FASE EXPERIMENTAL.....	14
3.1. Sustratos a ensayar	15
3.2. Confección de probetas	16
3.3. Metodología para realizar los ensayos.....	18
3.4. Realización de ensayos.	20
3.4.1. MONTAJE	20
3.4.2. REGISTRO DE DATOS	24
CAPÍTULO 4: RESULTADOS DE LOS ENSAYOS.....	26
4.1. SUSTRATOS	26
CAPÍTULO 5: MODELACIÓN COMPUTACIONAL	33
5.1. CONSIDERACIONES DEL MODELO.....	33
5.2. MODELO 1: CASA.....	34
5.2.1. Resultados	42
5.3. MODELO 2: EDIFICIO	47
5.3.1. Resultados	50
5.4. ANALISIS DE RESULTADOS.....	55
5.4.1. MODELO 1: CASA	55
5.4.2. MODELO 2: EDIFICIO	56

CAPÍTULO 6: BENEFICIOS DE LAS CUBIERTAS VEGETALES	58
6.1. Aumento de áreas verdes	58
6.2. Mejoras en el ciclo del dióxido de carbono y en la calidad del aire	58
6.3. Reducción del efecto isla de calor.....	58
6.4. Manejo y retención de escorrentías de aguas lluvia	59
6.5. Contribución a la biodiversidad y vida silvestre.....	59
6.6. Aislación acústica.....	59
6.7. Mejor desempeño térmico de los edificios	60
6.8. Aumento en la vida útil de las cubiertas	60
6.9. Estética	60
6.10. Económicos.....	60
6.11. Mejora de la calidad del aire interior	61
6.12. Otros	61
CAPÍTULO 7: CONSTRUCCIÓN	62
7.1. COMPONENTES DE LA CUBIERTA VEGETAL	62
7.1.1. Impermeabilización.....	62
7.1.2. Protección anti-raíz.....	63
7.1.3. Drenaje.....	63
7.1.4. Filtro	64
7.1.5. Sustrato	65
7.1.6. Capa vegetal	66
7.1.7. Componentes adicionales.....	70
7.2. CONSTRUCCIÓN DE FACHADAS	72
CAPÍTULO 8: COSTOS ECONÓMICOS	76
8.1. TECHOS	76
8.2. FACHADAS.....	77
CAPÍTULO 9: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	80
9.1. DISCUSIÓN	80
9.1.1. Discusión respecto a los ensayos de conductividad térmica.....	80
9.1.2. Discusión respecto al sustrato.....	80
9.1.3. Discusión respecto a la modelación	81
9.1.4. Discusión sobre la construcción de las cubiertas	82
9.1.5. Discusión sobre los costos económicos.....	83
9.1.6. Beneficios sociales y sustentabilidad global.....	83
9.2. CONCLUSIONES	85
9.3. Apreciación general	86

BIBLIOGRAFÍA	87
ANEXO A	90
ANEXO B	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Categorías de techos verdes. Fuente: CDT [3].	5
Tabla 2: Porcentajes por volumen de los sustratos a ensayar.	15
Tabla 3: Volumen [litros] de cada sustrato y sus componentes.	17
Tabla 4: Peso [gr] de cada sustrato y sus componentes.	17
Tabla 5: Pesos de los sustratos en cada probeta.	24
Tabla 6: Medidas de las dimensiones de los moldes de madera.	24
Tabla 7: Promedio de las dimensiones de los moldes.	24
Tabla 8: Densidad de los sustratos ensayados.	26
Tabla 9: Carga en [kg/m ²] aportada por los tres tipos de sustratos con los tres espesores seleccionados.	26
Tabla 10: Conductividad térmica seca de los sustratos ensayados.	26
Tabla 11: Resistencia térmica seca de los sustratos 1 y 2 a distintos espesores.	27
Tabla 12: Conductividad térmica del agua.	27
Tabla 13: Resistencia térmica de los sustratos con 0% de humedad.	29
Tabla 14: Resistencia térmica de los sustratos con 25% de humedad	29
Tabla 15: Resistencia térmica de los sustratos con 50% de humedad	29
Tabla 16: Resistencia térmica de los sustratos con 75% de humedad	29
Tabla 17: Resistencia térmica de los sustratos con 100% de humedad	29
Tabla 18: Valores exigidos para transmitancia y resistencia térmica según la OGUC.	30
Tabla 19: Aporte porcentual de los sustratos a la R total recomendada por norma al 0% de humedad.	31
Tabla 20: Aporte porcentual de los sustratos a la R total recomendada por norma al 25% de humedad.	31
Tabla 21: Aporte porcentual de los sustratos a la R total recomendada por norma al 50% de humedad.	31
Tabla 22: Aporte porcentual de los sustratos a la R total recomendada por norma al 75% de humedad.	31
Tabla 23: Aporte porcentual de los sustratos a la R total recomendada por norma al 100% de humedad.	31
Tabla 24: Temperatura media por mes en Santiago, Chile.	34
Tabla 25: Balance energético para la condición de invierno. Casa - caso base y techo verde.	44
Tabla 26: Diseño para la condición de verano. Casa - caso base.	44
Tabla 27: Diseño para la condición de verano. Casa – techo verde.	45
Tabla 28: Desglose del gasto energético anual de la casa.	45
Tabla 29: Balance energético para la condición de invierno. Edificio - caso base y techo verde.	51
Tabla 30: Diseño para la condición de verano. Edificio, piso 7 - caso base.	52
Tabla 31: Diseño para la condición de verano. Edificio, piso 7 – techo verde.	52
Tabla 32: Diseño para la condición de verano. Edificio, piso 8 - caso base.	52
Tabla 33: Diseño para la condición de verano. Edificio, piso 8 – techo verde.	53

Tabla 34: Desglose del gasto energético anual del edificio.....	53
Tabla 35: Comparación entre las pérdidas por techo y el gasto energético en calefacción. Modelo 1 – casa.....	55
Tabla 36: Comparación entre la carga total de enfriamiento. Modelo 1 – casa.....	55
Tabla 37: Comparación entre el gasto energético anual. Modelo 1 – casa.....	56
Tabla 38: Comparación entre las pérdidas por techo y el gasto energético en calefacción. Modelo 2 – edificio	56
Tabla 39: Comparación entre la carga total para enfriar. Modelo 2 – Piso 7 del edificio	56
Tabla 40: Comparación entre la carga total para enfriar. Modelo 2 – piso 8 del edificio	57
Tabla 41: Comparación entre el gasto energético anual. Modelo 2 – edificio	57
Tabla 42: Vegetación recomendada según espesor del sustrato.....	66
Tabla 43: Plantas recomendadas para espesores de sustrato entre 3 a 5 [cm].....	68
Tabla 44: Plantas recomendadas para espesores de sustrato entre 5 a 10 [cm].....	69
Tabla 45: Plantas recomendadas para espesores de sustrato entre 10 a 18 [cm].....	69
Tabla 46: Especies Chilenas con mejor adaptación visual en techos verdes.	70
Tabla 47: Costo aproximado de las capas de un techo verde.....	76
Tabla 48: Valor estimado de fachada vegetal	78
Tabla 49: Registro de datos de los ensayos - parte 1.	90
Tabla 50: Registro de datos de los ensayos - parte 2.	90
Tabla 51: Registro de datos de los ensayos - parte 3.	91
Tabla 52: Diseño para la condición de verano. Edificio, piso 1 - caso base.....	92
Tabla 53: Diseño para la condición de verano. Edificio, piso 1 - techo verde.	92
Tabla 54: Diseño para la condición de verano. Edificio, piso 2 - caso base.....	92
Tabla 55: Diseño para la condición de verano. Edificio, piso 2 - techo verde.	93
Tabla 56: Diseño para la condición de verano. Edificio, piso 3 - caso base.....	93
Tabla 57: Diseño para la condición de verano. Edificio, piso 3 - techo verde.	93
Tabla 58: Diseño para la condición de verano. Edificio, piso 4 - caso base.....	93
Tabla 59: Diseño para la condición de verano. Edificio, piso 4 - techo verde.	94
Tabla 60: Diseño para la condición de verano. Edificio, piso 5 - caso base.....	94
Tabla 61: Diseño para la condición de verano. Edificio, piso 5 - techo verde.	94
Tabla 62: Diseño para la condición de verano. Edificio, piso 6 - caso base.....	94
Tabla 63: Diseño para la condición de verano. Edificio, piso 6 - techo verde.	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Techo de césped en Noruega (Scandinavian Green Roof Association).....	3
Figura 2: Vista aérea de Stuttgart (Google Earth)	4
Figura 3: Capas del perfil típico de un techo verde.	6
Figura 4: Los distintos sistemas de fachadas vegetales.: Susan Loh (2008) [14].	7
Figura 5: Detalle del "Bolsillo" de un sistema tipo fieltro.....	8
Figura 6: Transmisión de calor en un muro.....	9
Figura 7: Dimensiones del molde de madera para armar las probetas a ensayar.	16
Figura 8: Probeta de madera en la máquina del Laboratorio de Higrotermia.....	16
Figura 9: Aspecto de la mezcla de un sustrato.....	17
Figura 10: Esquema del aparato de placa caliente de guarda.	18
Figura 11: Recipiente donde se realizó la mezcla del sustrato. Paso 1.	20
Figura 12: Secuencia de montaje, pasos 2, 3 y 4.....	21
Figura 13: Secuencia de montaje, pasos 5 y 6.....	22
Figura 14: Secuencia de montaje, Pasos 6, 7, 8 y 9.	23
Figura 15: Esquema del montaje.....	23
Figura 16: Voltímetro. Amperaje y voltaje del ensayo para el sustrato 2.....	25
Figura 17: Conductividad térmica vs contenido de humedad. Sailor & Hagos (2011)....	28
Figura 18: Conductividad Térmica vs Contenido de Humedad para los sustratos 1 y 2.	28
Figura 19: Zonificación térmica de la región Metropolitana (OGUC).	30
Figura 20: Aporte porcentual del sustrato 1 a la resistencia térmica recomendada en NCh1079-2008 según distintos espesores y contenidos de humedad.....	32
Figura 21: Aporte porcentual del sustrato 2 a la resistencia térmica recomendada en NCh1079-2008 según distintos espesores y contenidos de humedad.....	32
Figura 22: Plano de planta de casa. Medidas geométricas.....	35
Figura 23: Plano de la casa. Zonas según DesignBuilder.....	35
Figura 24: Perfil de muros exteriores.	36
Figura 25: Propiedades térmicas de muros exteriores.	37
Figura 26: Perfil de muros interiores.	37
Figura 27: Propiedades térmicas de muros interiores.	37
Figura 28: Perfil de techo tradicional.	38
Figura 29: Propiedades térmicas del techo tradicional.....	38
Figura 30: Propiedades del sustrato del techo verde.	39
Figura 31: Propiedades de la capa vegetal y el sustrato del techo.	40
Figura 32: Perfil del techo verde.....	41
Figura 33: Propiedades térmicas del techo verde.	41
Figura 34: Muros exteriores e interiores se mantienen en ambos casos.	42
Figura 35: Esquema del caso base.	43
Figura 36: Esquema del caso con techo verde.	43
Figura 37: Diseño para la condición de invierno. Casa- caso base.....	43
Figura 38: Diseño para la condición de invierno. Casa - techo verde.	44

Figura 39: Gráficos del consumo energético anual. Casa – caso base.....	46
Figura 40: Gráficos del consumo energético anual. Casa - techo verde.....	46
Figura 41: Dimensiones de la planta tipo del edificio.	47
Figura 42: Planta tipo del edificio. Zonas según DesignBuilder.....	48
Figura 43: Perfil de losas interiores del edificio.	49
Figura 44: Propiedades térmicas de losas interiores.....	49
Figura 45: Esquema del edificio - caso base.....	50
Figura 46: Esquema del edificio - techo verde.	50
Figura 47: Diseño para la condición de invierno. Edificio - caso base.....	51
Figura 48: Diseño para la condición de invierno. Edificio - techo verde.	51
Figura 49: Gráfico del balance energético anual. Edificio – caso base.	54
Figura 50: Gráfico del balance energético anual. Edificio – Techo verde.....	54
Figura 51: Hotel Intercontinental. Vitacura, Santiago. Fachada verde - paneles.....	73
Figura 52: Fachada ajardinada del edificio Consorcio (Enrique Browne [2]).....	74
Figura 53: Interior del edificio Consorcio en verano (Enrique Browne [2]).	74
Figura 54: Consumo energético – Consorcio (2007) [2].	79
Figura 55: Costo económico – Consorcio (2007) [2].	79

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Con el aumento de la población, las zonas urbanas son cada vez de mayor tamaño. Debido a la construcción de edificios, casas, caminos, carreteras, centros comerciales, hospitales y todo tipo de infraestructura similar, las áreas verdes de las ciudades son arrebatadas y aquellas que permanecen, son exiguas y por tanto enormemente valoradas. La contaminación ambiental sigue siendo un constante problema que no solo es producido por los entes emisores de contaminantes, sino también afectada por la poca vegetación que existe disminuyendo la tasa de transformación de gases como el CO₂ en oxígeno. El efecto de isla de calor provocado por el cambio de naturaleza autóctona por materiales pétreos de construcción como el hormigón, asfalto, pavimento, entre otros, provoca que las temperaturas en las zonas urbanizadas sean mayores que en sus alrededores afectando directamente la calidad de vida de los habitantes de la ciudad.

El confort de las viviendas es un tema que muchas veces no se considera en el diseño, y que dadas las condiciones climáticas del lugar debe ser estudiado en cada caso particular con más diligencia. Las grandes pérdidas de calor en invierno provocan altos gastos de calefacción y los grandes flujos de calor hacia las estructuras con poca inercia térmica y/o malos aislantes, hacen que en verano las temperaturas se eleven en los interiores de las viviendas a valores inaceptables de calidad y confort.

Desde los años 70 en Alemania los techos verdes¹ y fachadas vegetales vienen demostrando que son una de las mejores opciones para solucionar parte de estos problemas. Se ha podido constatar que son buenos aislantes térmicos, más en verano que en invierno, pero siempre mejorando respecto a los tejados y muros típicos. Aumentan también la aislación acústica, mejoran el manejo de la escorrentía de aguas lluvia, aporta a la biodiversidad y vida silvestre, contribuyen a aumentar las superficies de áreas verdes en las ciudades populosas generando ambientes más sanos, agradables y estéticos, lo que inclusive ayuda en la productividad de los trabajadores, la calidad de vida en los edificios habitacionales e incluso se ha demostrado mejor recuperación de pacientes en hospitales solo por el hecho de ver y estar más en contacto con la naturaleza.

En términos básicos existen tres tipos de techos vegetales: los extensivos, semi-intensivos e intensivos. Los primeros son en general de vegetación simple y de poca mantención, con un espesor de sustrato bajo y no transitables para las personas aportando una carga que no se aleja de las típicas cargas de techo. Por el otro lado, las cubiertas intensivas son lo más parecido a lo que se conoce comúnmente como un jardín, donde se permite el tránsito libre y casi cualquier tipo de vegetación, pero por lo mismo, requieren de una mantención constante, un espesor de sustrato mucho mayor y por ende su aporte a la carga de la techumbre es elevada, por lo que medidas especiales para la estructura soportante se harían necesarias.

¹ Conocidos también como techos vegetales, cubiertas ecológicas o Greenroofs.

Dentro de las fachadas vegetales se distinguen también tres tipos de sistemas: El sistema de paneles, que normalmente están directamente conectados con la estructura y algún sistema de riego. Las fachadas tipo fieltro, donde las plantas son puestas dentro de 'bolsillos' impermeables que se anclan a la estructura. Y los sistemas tipo contenedor o enrejado, donde las plantas crecen en contenedores para luego trepar directamente por los muros o por alguna estructura auxiliar, tal como lo haría una enredadera.

Si bien existe un manual de recomendaciones para la instalación de techos verdes, no hay (en nuestro país) valores que cuantifiquen el ahorro energético que podría producir una cubierta de este tipo producto de su aporte a la aislación térmica que le produciría al edificio o casa en donde se instale. Es por ello que se busca determinar las propiedades térmicas de estos sistemas, ensayando una muestra de sustrato representativo según la norma NCh 850 of2005 y haciendo los cálculos necesarios según la norma NCh 853-2007, agregando también una modelación computacional con el programa Design Builder[®], para finalmente terminar con un balance económico.

1.1. Objetivo General

- Aportar al conocimiento sobre estrategias sustentables en la edificación.

1.2. Objetivos específicos

- Determinar de forma teórica y a través de ensayos la resistencia térmica de los techos vegetales.
- Cuantificar el soleamiento de verano y la inercia térmica que el sistema aporta a través del uso del programa Design Bulder [®], para que ingresando los datos climáticos, tipo de materiales y orientación del edificio evalúe energéticamente al edificio modelado.
- Basado en el manual publicado por la Corporación de Desarrollo Tecnológico (CDT) "Recomendaciones Técnicas para Proyectos de Cubiertas Vegetales", recoger antecedentes sobre la construcción e instalación de cubiertas vegetales, el que hace referencia solo a techos y no fachadas, por lo que se pretende ampliar su contenido mediante un aporte que será la parte experimental de este trabajo, los cálculos teóricos y la modelación.
- Realizar un balance económico tentativo.

CAPITULO 2: ANTECEDENTES

2.1. Cubiertas vegetales

Reseña histórica

Actualmente se considera a las cubiertas vegetales como una opción moderna que reemplaza o cubre a los materiales típicos de techumbre y fachada. Sin embargo, los techos verdes fueron 'redescubiertos' comenzado el siglo XX en Alemania donde se comenzaron a formalizar estudios en los años 70 y se normó su uso bajo la FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau). Desde allí se ha esparcido en mayor medida al resto de Europa y Norteamérica, tanto en uso como en tema de investigación.

Los primeros techos verdes datan de los jardines colgantes de Babilonia en el siglo XVIII donde su fin era más bien paisajístico y estético, pero son los tradicionales techos de pasto Escandinavos construidos sobre turba (Ilustración 1) donde se siguen usando debido a las bajas temperaturas, por sus propiedades como aislante térmico.



Figura 1: Techo de césped en Noruega (Scandinavian Green Roof Association)

Desde este nuevo y contemporáneo comienzo para las cubiertas vegetales, Alemania ha permanecido como el líder mundial en su uso, políticas de incentivo e investigación, siendo el único país con una normativa vigente² (FLL) y estimando que más del 10% de los techos del país se pueden considerar verdes, resaltando Stuttgart (Figura 2) sobre el resto de las ciudades. Actualmente existen guías en Estados Unidos y Canadá, donde también se está trabajando mucho en políticas que permitan

² EEUU, Canadá y otros países de Escandinavia tienen guías de diseño y construcción, pero no normativas. En el caso de Chile, la corporación del desarrollo tecnológico (CDT) ha publicado un manual de recomendaciones para la instalación de cubiertas vegetales [3].

aumentar el uso de estos sistemas, principalmente por su aporte en el manejo de las aguas lluvias y su mejora en el desempeño energético de los edificios.



Figura 2: Vista aérea de Stuttgart (Google Earth)

En Sudamérica y Asia el tema aún no está tan desarrollado, pero existe un creciente interés debido los beneficios que otorgan las instalaciones de techos y fachadas vegetales.

2.2. TECHOS VERDES

2.2.1. Clasificación

Se distinguen tres categorías de techos vegetales que se diferencian por la mantención que requieren, si son o no transitables, la diversidad de vegetación y producto de esto, el peso que aportan como sobrecarga a la estructura de techo.

Intensivo: En este tipo de cubiertas puede ser usado desde pasto y pequeños arbustos, hasta arboles de pequeño y mediano tamaño ya que la profundidad del sustrato es mayor de 15 centímetros. Además, suelen ser cubiertas transitables. Por lo anterior, la mantención de los techos intensivos debe ser muy periódica y el peso que aportan cuando están completamente saturados de agua es mayor a los 250 kilogramos por metro cuadrado.

Extensivo: Son cubiertas donde se priorizan una baja carga a la estructura, en lo ideal menor a 150 kilogramos por metro cuadrado con un sustrato que no supera los 15 centímetros de profundidad, y escasa mantención. No son transitables y tienen una diversidad vegetal restringida en general a pequeños arbustos y especies del tipo *sedum*, que se comportan bien en condiciones de sequía y poco cuidado.

Semi-intensivo: Son un punto medio entre las cubiertas extensivas y las intensivas. Pueden o no ser transitables según las especificaciones del diseño y las características estructurales del edificio. Tienen restricciones en la vegetación y requieren mantención variables según el diseño paisajístico.

Tabla 1: Categorías de techos verdes. Fuente: CDT [3].

Característica	Extensivo	Semi-intensivo	Intensivo
Espesor sustrato	< 15 cm	10 - 20 cm	> 15 cm
Cobertura vegetal	No transitable	Según diseño	Transitable
Peso saturado	50 - 150 kg/m ²	150 - 250 kg/m ²	> 250 kg/m ²
Diversidad vegetal	Poca	Media	Máxima
Mantención	Mínima	Variable	Alto
Tipo de vegetación	Rastreras, <i>Sedum</i>	Arbustos pequeños y pastos ornamentales	Arbustos y árboles pequeños

2.2.2. Componentes

Considerando la capa vegetal y el sustrato, existen componentes mínimos (figura 3) que forman la cubierta vegetal que se deben incluir necesariamente en el diseño y construcción, para así mantener la edificación seca, libre de humedad y de la acción destructiva que pueden ocasionar las raíces de las plantas.

Básicos

- **Capa vegetal:** es la zona en donde se ubican las plantas y árboles³.
- **Sustrato:** o medio de crecimiento, es el encargado de crear el ambiente propicio para la vida de las plantas y/o árboles de la capa superior. El espesor quedará condicionado al tipo de cubierta que se construya y la vegetación seleccionada.
- **Filtro:** Para retener los finos y no tapar las zonas de drenaje de agua suele usarse un geotextil sobre y bajo la capa de drenaje y retención.
- **Drenaje y retención:** Para que no se sobresature de agua el sustrato, pero a la vez retener lo necesario para la sobrevivencia de las plantas, la capa de drenaje y retención deja pasar el exceso y mantiene guardada una cantidad adecuada.

³ En el caso de cubiertas intensivas o semi intensivas.

- **Barrera anti raíces:** Es la barrera protectora encargada de que las raíces de las plantas no pasen a la impermeabilización ni la estructura. Suele utilizarse una capa de polietileno de alta densidad (HDPE).
- **Impermeabilización:** De suma importancia para la integridad de la estructura, pues mantiene la edificación seca y libre de humedad. Suelen usarse membranas de aplicación líquida de poliuretano, láminas de PVC o caucho sintético, entre otras.
- **Estructura soportante:** Proporciona la superficie que sirve de soporte para la instalación del techo vegetal. Debe soportar el peso máximo calculado para la cubierta a instalar. Las típicas estructuras soportantes suelen ser losas de hormigón armado o bien elementos prefabricados de madera y metal o cualquier estructuración debidamente especificada que asegure mantener el peso de las capas superiores

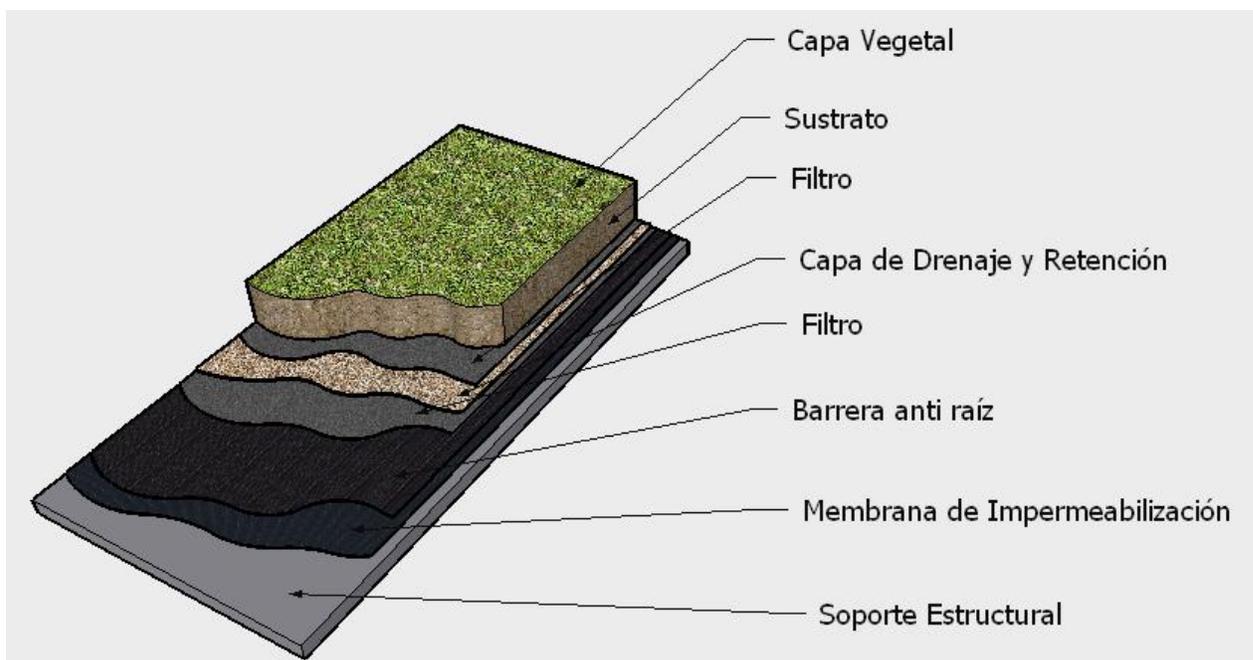


Figura 3: Capas del perfil típico de un techo verde.

Opcionales

Se pueden agregar otras capas opcionales al perfil típico de un techo verde mostrado en la figura 3, además de otros componentes que permiten una mejor y más fácil mantención del techo.

- **Protección de la impermeabilización:** Es usada sobre la membrana de impermeabilización para brindar una protección extra durante la construcción del edificio o la misma cubierta.
- **Aislación térmica:** Puede ubicarse bajo o sobre la estructura soportante con el fin de disminuir los flujos de calor y mejorar el desempeño térmico del edificio.

- Protección de erosión: Sirve para mantener al sustrato fuera del riesgo de erosión producto del viento en techos muy elevados o inclinados cuando las raíces de las plantas aún no han crecido lo suficiente como para permitir mantener en su lugar a el medio de crecimiento.
- Sistema de riego: Permite un mejor y más fácil control del riego de la cubierta.
- Retenedores perimetrales: Para separar las cubiertas de elementos como antepechos, drenajes, tragaluces u otros similares.
- Cajas registrables: Permiten inspeccionar los puntos de desagüe para mantenerlos limpios.
- Otros: Elementos adicionales como barandillas de separación entre zonas vegetadas y no vegetadas, iluminación y pasarelas para el tránsito de personas pueden ser agregados según se estime en el proyecto.

2.3. FACHADAS VEGETALES

2.3.1. Clasificación

Se clasifican las fachadas vegetales de acuerdo al tipo de instalación en tres sistemas (figura 4). Al no ser transitables y estar claramente limitados en peso, no se hace la distinción de fachadas intensivas o extensivas.

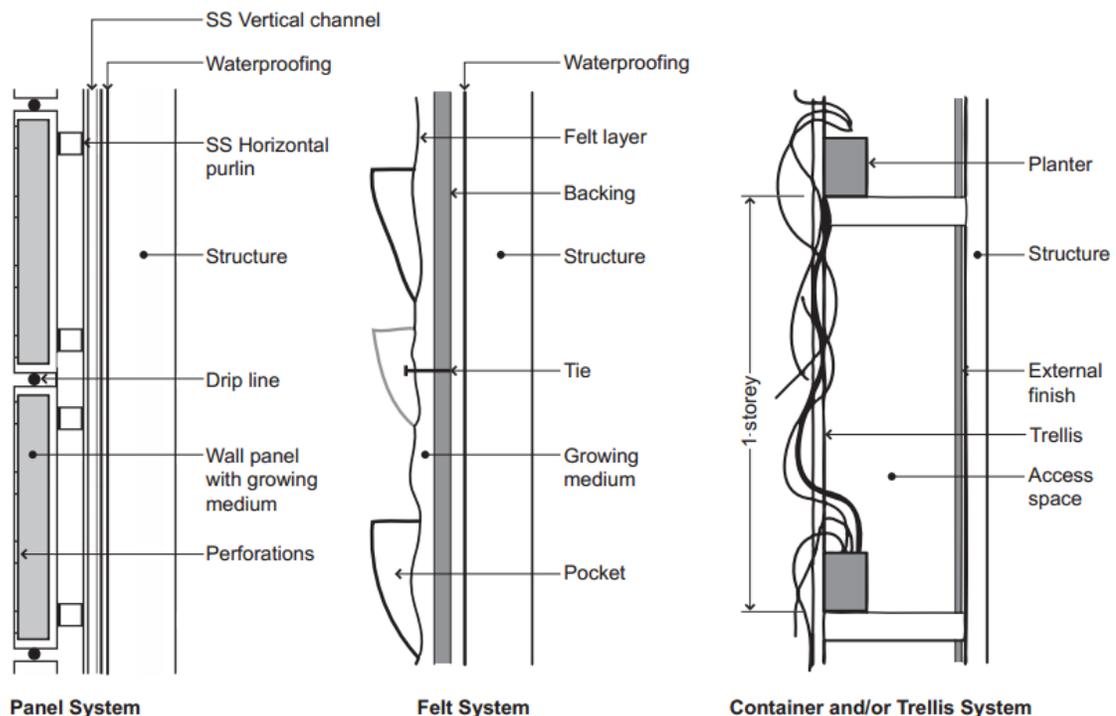


Figura 4: Los distintos sistemas de fachadas vegetales.: Susan Loh (2008) [14].

Tipo panel: normalmente consta de paneles pre plantados que se conectan al sistema estructural y a un sistema de riego mecánico.

Tipo fieltro: donde las plantas son puestas en bolsillos rellenos con el sustrato adecuado, anclados a una barrera impermeable que se conecta con la estructura. El sistema de riego puede ser variado según la altura del edificio y las necesidades de la vegetación.

Tipo enrejado: las plantas crecen dentro de contenedores o maceteros, escalando por un enrejado. Pueden tener sistema de riego mecanizado o manual. Son lo más parecido a lo que se puede entender como una persiana exterior vegetal.



Figura 5: Detalle del "Bolsillo" de un sistema tipo fieltro.

Las fachadas vegetales también pueden ser usadas al interior de casas y edificios con cualquiera de los tres sistemas anteriormente identificados, ayudando a mantener un aire más limpio.

2.4. Transmisión de calor

La transmisión de calor se produce cuando existe una diferencia de temperatura entre dos elementos o bien entre dos partes del mismo. Estas transferencias de energía pueden manifestarse en forma de tres fenómenos: convección, radiación y conducción, siendo este último de mayor y especial interés para este trabajo de investigación.

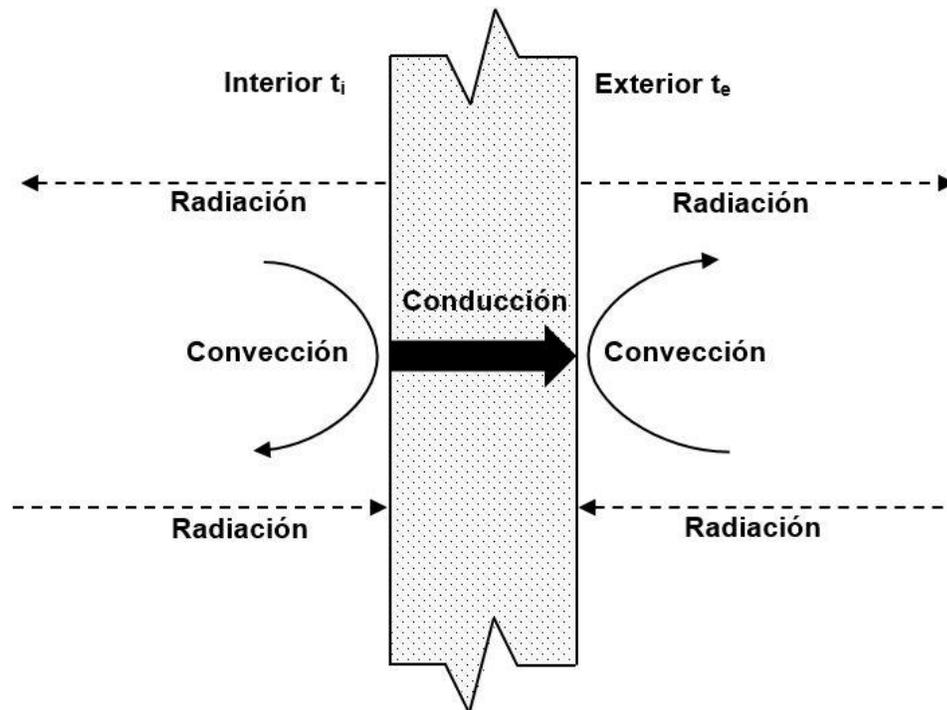


Figura 6: Transmisión de calor en un muro.

La convección se produce a través de un medio fluido que transporta el calor de una zona a otra, produciéndose por ejemplo, entre la superficie de un cuerpo y el aire circundante a su alrededor. La radiación ocurre entre dos superficies producto de que todos los objetos emiten energía en forma de ondas electromagnéticas. Por último, la conducción se produce por el contacto directo entre las partículas de dos cuerpos o por el gradiente generado cuando existe una diferencia de temperatura entre dos partes del mismo elemento.

En los muros y techos la transferencia de calor entre la superficie interior y exterior (o viceversa) suele producirse por conducción pura, pero debido a que ningún material es perfectamente homogéneo y a la presencia de huecos de aire, ocurre también transmisión en forma de convección y radiación.

2.5. Conductividad térmica

La conductividad térmica (λ) queda definida según la norma NCh 853 Of. 91 como la cantidad de calor que en condiciones estacionarias pasa en una unidad de tiempo a través de una unidad de área de una muestra de material homogéneo de extensión infinita, de caras planas y paralelas y de espesor unitario, cuando se establece una diferencia de temperatura unitaria entre sus caras. Esta se expresa en unidades de $W/(m K)$.

En términos sencillos, λ es la facilidad con que los materiales dejan pasar el flujo de calor. Mientras mayor es el valor de esta propiedad, el material es más conductor y menos resistencia pone a la transferencia de calor.

La norma NCh 853-2007 entrega valores de conductividad térmica para materiales en estado seco y a una temperatura media de 20°C. Experimentalmente, esta propiedad se puede determinar mediante el procedimiento establecido en la norma chilena NCh850-2008 “*Método para la determinación de la conductividad térmica en estado estacionario por medio del anillo de guarda*”.

La densidad, humedad y temperatura afectan directamente los valores de la conductividad térmica del material a ensayar. Otros como la anisotropía, color y presión atmosférica lo hacen en menor medida.

Densidad: Mientras menor es la densidad el material, menor es la conductividad. Sin embargo existe un límite (densidad óptima) donde comienza a aumentar, producto de que el tamaño de poros se vuelve considerable, lo que genera aumento de la transmisión de calor por convección.

Humedad: El agua es un buen conductor, por lo que cuando un material absorbe humedad aumenta el valor de λ , disminuyendo su capacidad de aislación.

Temperatura: Debido a que los choques entre las moléculas de un material aumentan con la temperatura, la conductividad se ve afectada de la misma forma, ocurriendo el caso contrario cuando disminuye la temperatura haciendo que baje el valor de λ .

2.6. Sensación térmica y confort habitacional

En las viviendas, la sensación térmica interior es de fundamental importancia para los habitantes. Una temperatura muy alta o muy baja genera efectos negativos en la comodidad de las personas, pudiendo incluso llegar a afectar su salud. Además de los métodos típicos de climatización, como estufas u otro sistema de calefacción en invierno, y el aire acondicionado en verano, la envolvente térmica de los edificios, que está formada por la suma de los distintos elementos perimetrales que en su conjunto arman el perfil de muros, suelo y techo, es de esencial importancia, pues es a través de ellas que se generan las pérdidas de calor hacia el exterior en las estaciones frías, y las ganancias térmicas hacia el interior en época estival.

La conductividad térmica (λ) y el espesor (e) de los materiales que forman la envolvente, influyen directamente en el acondicionamiento térmico del edificio, pues la resistencia térmica, que no es más que el cociente entre el espesor del elemento y la conductividad térmica del mismo, es la que afecta directamente las pérdidas y

ganancias. Así, la resistencia del conjunto es la suma de las resistencias de cada elemento que forma el perfil de las distintas partes de la envolvente.

$$R_T = \sum \frac{e}{\lambda} \quad (1)$$

Es por esto que la elección correcta de los materiales de construcción para una zona climática específica es fundamental en el diseño de cualquier edificio, pues la resistencia térmica de ellos permitirá el confort térmico de los habitantes durante los años de ocupación. En general, en la fase previa a la ejecución de cualquier proyecto, se priorizan diseños económicos minimizando el espesor de muros y losas, lo que en la etapa de construcción tiene, evidentemente, un menor costo mientras más pequeño es este valor en elementos estructurales como muros y losas de hormigón armado, y no estructurales como tabiquería. Pero pensando a mediano y largo plazo, esto puede tener un costo mayor, ya que se deja de lado el costo del desempeño energético del edificio.

Una casa o edificio que tiene una envolvente térmica con baja resistencia debido a los materiales que fueron escogidos o a una gran área de ventanas⁴ en una orientación geográfica que implica muchas ganancias térmicas en verano y grandes pérdidas en invierno, es una vivienda que no está bien diseñada. El costo de mantener al interior una temperatura adecuada para el confort de los habitantes será muy alto y así también las fluctuaciones de temperatura de los materiales, produciéndose un estrés térmico que conlleva a acortar la vida útil de estos elementos. Son por estas razones que los criterios que en un principio pueden parecer ‘economizadores’ y que de todas formas pueden llegar a serlo para quién fuese el mandate o constructora a cargo del proyecto, luego, son para los ocupantes de estas edificaciones motivo de problemas, incomodidades y gastos elevados hablando en términos de energía. Esto no solo se reduce al problema de mantener una sensación térmica interior agradable, que incide directamente en el costo de la energía que se esté utilizando para climatizar, también afecta el consumo generalizado y la demanda de energía a un nivel macro. Y estando actualmente en un país y en un mundo en que las energías se hacen cada vez más caras y escasas, pensar de la forma tradicional reduciendo costos en un principio, no implica necesariamente pensar de forma ‘economizadora’ mediano o largo plazo.

Por eso, las estrategias constructivas sustentables que pueden aportar a mejorar el desempeño térmico de una casa o edificio, y que como los techos y fachadas vegetales tienen muchos otros beneficios, comienzan a tomar importancia en el ámbito de la edificación.

⁴ Como los espesores de los vidrios son bajos, la resistencia térmica de ellos es también muy baja.

2.7. Balance térmico de un edificio

Del balance de las pérdidas y las ganancias de un edificio o casa se obtiene el desempeño térmico.

Pérdidas: Existen a través del perímetro de la estructura, esto es muros, techos y suelo. También hay pérdidas por ventilación cuando existen fugas de aire caliente, pérdidas por flujo de aire indeseado por rendijas de puertas y ventanas. Es por esto que el área de puertas y ventanas, al ser materiales que poseen resistencia térmica relativamente menores a muros y techos, son de importante consideración en el cálculo.

Ganancias: Los aparatos de calefacción aportan con ganancias térmicas al interior de un edificio. Aparatos como estufas, cocinas, ampollitas, emiten calor. Los ocupantes aportan calor dependiendo de la tasa de actividad física a la que se encuentran. También existen ganancias por conducción a través de muros y techos en verano, y aportaciones solares a través de superficies acristaladas debido principalmente a su efecto invernadero.

Muchas veces suele considerarse despreciable los flujos térmicos entre la separación de distintas habitaciones al interior de una casa o edificio. Sin embargo, existen ya sea por convección, radiación o conducción, pudiendo ser modelados en el caso de los dos primeros, mediante el coeficiente superficial de transferencia térmica (h [$W/(m^2 \text{ } ^\circ K)$], h_i para interior y h_e para exterior). Los cambios térmicos producto de la conducción dependen directamente de la resistencia térmica de muros y techos (R). Cuando se generan flujos entre el interior y el exterior a través de la envolvente térmica, la resistencia térmica total es la suma de las resistencias de los materiales que forman el muro y la oposición a las pérdidas al interior y exterior:

$$R_{total} = \frac{1}{h_i} + \sum R_{materiales(muro\ o\ techo)} + \frac{1}{h_e} = R_{si} + R_{muro} + R_{se} \quad (2)$$

Los valores de R_{si} y R_{se} son pequeños y en general constantes, que dependen esencialmente de la velocidad del aire y la dirección del flujo en el caso de flujos verticales (en techos), por lo que el real aporte a la resistencia total lo entrega la resistencia del elemento constructivo. Se llama transmitancia térmica (U) al valor inverso de la resistencia total.

$$U = \frac{1}{R_{total}} \quad (3)$$

Para estimar la necesidad de calefacción o refrigeración también se deben considerar las pérdidas producto de las renovaciones de aire, iguales al calor específico del aire ($0,35$ [$W / (m^3 \text{ } ^\circ C)$]) por el número de renovaciones por hora (n) en la vivienda,

por la diferencia de temperatura en grados. La sumatoria de las transmitancias térmica (U) por la superficie de cada elemento (S) de la envolvente, dividido por el volumen de la vivienda (V_t) en conjunto con las pérdidas por renovación, entregan el valor de las pérdidas globales de la vivienda (G), proporcional a la diferencia de temperatura entre el exterior y el interior (en general, $T_i - T_e$ en invierno y $T_e - T_i$ en verano).

$$G = \frac{(\sum_i U_i \cdot S_i)}{V_t} + 0,35 \cdot n \quad (4)$$

Finalmente, las pérdidas de la vivienda se expresan como:

$$P = G \cdot V_t (\Delta T) \quad (5)$$

CAPÍTULO 3: FASE EXPERIMENTAL

Con el fin de determinar el aporte de las cubiertas vegetales a la resistencia térmica de la envolvente de una vivienda, la fase experimental consiste en medir la conductividad térmica de distintos sustratos, debido a que este componente es la gran parte del espesor del perfil de un techo verde.

Debido a la complejidad de los sistemas y la variabilidad de los 'sustratos'⁵ usados en fachadas vegetales, esta etapa del trabajo podría verse limitada a la medición de la propiedad térmica únicamente de los techos verdes. Pero por lo mismo, los sustratos podrían ser usados también en muros verdes bajo un mecanismo que así lo permita.

Como el resto de los materiales del perfil del techo tienen conductividad térmica conocida citada en la norma NCh853-2007, y la resistencia total es la suma de los componentes que arman el muro o techo, no fue necesario realizar la medición de esta propiedad. Además, como se ha mencionado con anterioridad, debido a los bajos espesores de muchas de estas capas (impermeabilización, barrera anti raíces y filtros) en términos del aporte a la resistencia térmica de la envolvente podría considerarse despreciables, por el orden de magnitud en el que aportan⁶.

Si bien la Norma NCh850-2008 describe el procedimiento para ensayar materiales en probetas secas, el sustrato de un techo vegetal suele tener un contenido de humedad no despreciable. Originalmente se planteó la idea de realizar dos ensayos para cada mezcla de sustrato: uno de la muestra seca y uno de la muestra saturada de agua. Con ello, se podría hacer una interpolación entre el valor con 0% al 100% de contenido de humedad, describiendo el comportamiento para cualquier punto dentro de esto. Sin embargo, dada la dificultad de mantener la humedad en la probeta del medio de crecimiento ensayado y debido a que el ensayo por norma indica usar muestras secas, aunque se han realizado mediciones con probetas húmedas (Erazo, 2007 [4]) para luego interpolar como se menciona, gracias a la revisión bibliográfica efectuada y lo presentado en el I seminario de Infraestructura vegetada [24] realizado el presente año, se usa esto como base para extrapolar los resultados obtenidos en la fase experimental.

Por lo anterior, se ha decidido realizar el ensayo para medir la conductividad térmica de tres sustratos característicos de techos verdes. Así se obtiene el valor para la muestra seca y se extrapolan los resultados según se detallará en la sección de cálculo en el capítulo 4.

⁵ Debido a la verticalidad de estos sistemas, usar mezclas de material parecidas al sustrato que se usa en un techo verde limitaría su uso a fachadas tipo fieltro.

⁶ En el Capítulo 4 se ve en detalle el cálculo y por qué puede considerarse despreciable el valor de la resistencia de estos elementos.

3.1. Sustratos a ensayar

Las probetas a ensayar son tres sustratos con distintos contenidos de materia orgánica, arena y minerales. Las mezclas que se han realizado están basadas las mediciones realizadas por Sailor y Hagos [23], en conjunto con lo recomendado separadamente, por dos Ingenieros Agrónomos de la Universidad Católica.

El contenido de materia orgánica en los techos verdes debe ser más bien bajo, recomendando menos del 20% por la guía FLL [5] debido al exceso de crecimiento de plantas y la aparición de malezas. Para las probetas se decide usar turba como materia orgánica debido a que es un compost ciento por ciento vegetal y de mejor calidad que el compost tradicional. En base a lo visto y la información proporcionada por la arquitecta Vicky Rojas, se decide usar como agregados a la arena, vermiculita y perlita, materiales que ya han sido usados en otros proyectos de infraestructura vegetal.

La perlita es una forma de vidrio volcánico que tiene buen drenaje de agua y pH neutral, permitiendo a las raíces de las plantas respirar y debido a su liviano peso es un buen sustituto de la arena.

La vermiculita es un mineral de silicato semejante a la mica, que al ser calentada a altas temperaturas se expande. Es capaz de retener humedad y los nutrientes de las plantas. Es de peso liviano y funciona muy bien para sostener el crecimiento de semillas, lo que es recalable si se desea hacer una instalación in-situ de la capa vegetal de un techo verde. Al tener propiedades complementarias a la perlita, suelen usarse en conjunto.

Tabla 2: Porcentajes por volumen de los sustratos a ensayar.

Probeta	Turba	Vermiculita	Perlita	Arena	Total
Sustrato1	10%	33%	23%	33%	100%
Sustrato2	20%	33%	13%	33%	100%
Sustrato3	9%	52%	22%	17%	100%

3.2. Confección de probetas

Dadas las dimensiones del anillo de guarda, las dos probetas necesarias para realizar el ensayo, deben tener una dimensión máxima de 55x55 [cm²], con un espesor de 4 [cm]. La densidad de los sustratos suelen ser variables según el tipo de cubierta que se use. El material no debe ser muy compactado para lograr una correcta circulación del agua cuando se instala y sus densidades suelen variar. Considerando los pesos de las cubiertas extensivas, las densidades de las mezclas realizadas son cercanas a los 1000 [kg/m³], valor que entrega una carga menor a 150 [kg/m²] para espesores de 15 [cm] o menores.

Para armar las probetas se confeccionaron dos moldes iguales de madera de las dimensiones indicadas (figura 7), los cuales son cubiertos en ambas caras con papel kraft para posteriormente conectar las termocuplas (figura 8). Se tapa primero la cara inferior y se rellena el molde con el sustrato correspondiente para finalizar tapando por encima.

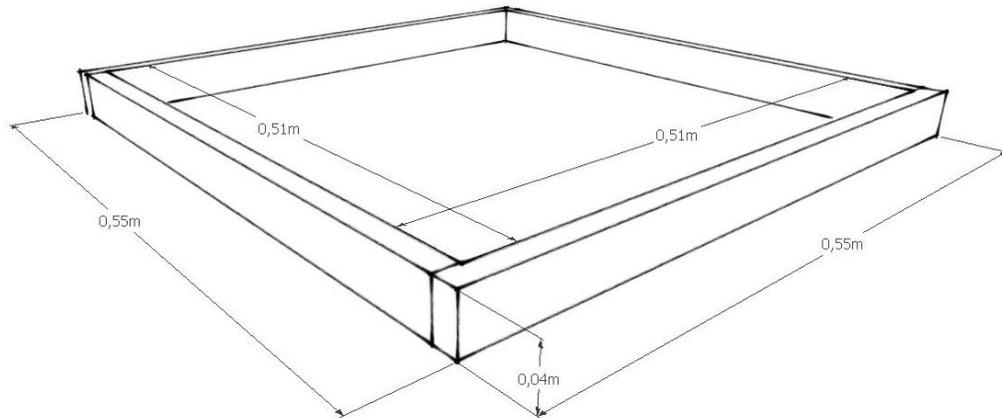


Figura 7: Dimensiones del molde de madera para armar las probetas a ensayar.



Figura 8: Probeta de madera en la máquina del Laboratorio de Higrotermia.

Según el volumen de la probeta, mezclando aproximadamente 30 litros por sustrato en los contenidos definidos en la Tabla 2, se pesaron las bolsas de vermiculita, perlita y turba (bolsas de 20 [litros]) para obtener la densidad de cada uno y así calcular el peso necesario (Tabla 4). Se usó arena de lampa de densidad aproximada 1500 [kg/m³] y con ello se procedió a realizar la mezcla (Figura 9).

Tabla 3: Volumen [litros] de cada sustrato y sus componentes.

Probeta	Turba	Vermiculita	Perlita	Arena	Total
Sustrato1 [litros]	3,00	10,00	7,00	10,00	30
Sustrato2 [litros]	6,00	10,00	4,00	10,00	30
Sustrato3 [litros]	3,58	20,29	8,80	6,68	39,35

Tabla 4: Peso [gr] de cada sustrato y sus componentes. Pesados al realizar las mezclas.

Probeta	Turba	Vermiculita	Perlita	Arena	Total
Sustrato1 [gr]	497	585	673	16405	18160
Sustrato2 [gr]	1020,5	586	382	15038	17026,5
Sustrato3 [gr]	600	1278,5	859,5	10014,5	12752,5



Figura 9: Aspecto de la mezcla de un sustrato.

3.3. Metodología para realizar los ensayos

Para determinar la conductividad térmica en materiales se emplea la norma NCh 850.Of2008: “Método para la determinación de la conductividad térmica en estado estacionario por medio del anillo de guarda” [8], que establece el procedimiento para determinar esta propiedad bajo régimen de flujo estacionario. Se aplica a materiales homogéneos, cuyas características de densidad, humedad y temperatura media son conocidas, siendo válido para temperaturas comprendidas entre los 0°C y 100°C.

El método del anillo de guarda consiste en una placa metálica circular provista de calefacción eléctrica para calentarla, rodeada de otra placa (anillo de guarda) que puede ser calentada en forma independiente (A en la figura 10). Se colocan dos probetas de iguales dimensiones y de caras planas y paralelas del material a ensayar, a ambos lados de la placa caliente, cada una en contacto con otra placa metálica refrigeradas por corriente de agua en las caras frías de las probetas.

Al efectuar el ensayo, el anillo de guarda es mantenido a la misma temperatura que la placa caliente, de modo que se obtiene el mismo gradiente de temperatura en el material que se encuentra junto a él, que en la proximidad de la placa caliente. Así, el flujo térmico es perpendicular con respecto a las superficies, además de no presentar pérdidas de calor en los bordes de la placa caliente.

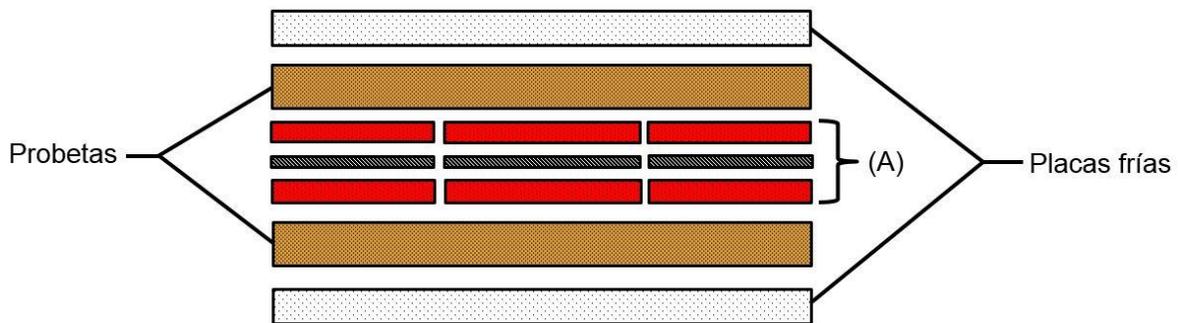


Figura 10: Esquema del aparato de placa caliente de guarda.

Al llegar al régimen estacionario, se determina el flujo térmico (Φ , igual a la potencia eléctrica disipada en la placa caliente) que atraviesa el área correspondiente de las dos probetas y el gradiente medio de temperatura a través de éstas. Así la conductividad térmica se calcula con el área de la placa de calentamiento (A [m²]), el espesor de la probeta (e [m]), la temperatura de las caras calientes (T_2 [°K]), la temperatura de las caras frías (T_1 [°K]) y el flujo térmico (Φ [W]) con la ecuación:

$$\lambda = \frac{\phi \cdot e}{2 \cdot A \cdot (T_2 - T_1)} \quad (6)$$

Para restringir las pérdidas de calor, se aplica aislación al aparato esquematizado en la figura 10 sumergiendo el conjunto en perlitas de poliestireno expandido.

Las probetas deben ser lo más idénticas posible, tener sus caras planas y paralelas y cubrir como mínimo el área de la unidad de calentamiento. Conforme a lo explicitado en la norma, el gradiente de temperatura no puede ser inferior a 5°C ni superior a 15°C durante el ensayo.

Al tener las dimensiones lineales de cada probeta y su peso, se calcula con ello la densidad.

Para realizar el ensayo en muestra secas, se secan los sustratos en un horno durante dos días a 50°C, realizando pesajes hasta que su peso no varíe y garantice una humedad nula.

3.4. Realización de ensayos.

Los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Higrotermia del IDIEM, ubicado en Salomón Sack 840, Cerrillos, Santiago de Chile.

3.4.1. MONTAJE

La secuencia de montaje de los ensayos realizados fue:

1. Se calculan los pesos aproximados de cada componente necesario para armar las dos probetas de los distintos sustratos según lo indicado en la tabla 3, obteniendo un peso final y mezclando en las proporciones que se muestran en la tabla 4.



Figura 11: Recipiente donde se realizó la mezcla del sustrato. Paso 1.

2. Se coloca el molde de madera sobre la cara fría inferior de la máquina, sellado en la parte inferior con papel kraft y al centro, entre la placa fría y el papel, son fijadas las termocupas.
3. Se llena gradualmente la probeta inferior con la mezcla del sustrato a ensayar, compactado de forma manual para llenar todos los espacios y respetar la altura de la probeta.
4. Una vez lleno del sustrato, el molde es sellado en su cara superior con papel kraft, donde se colocan las termocupas correspondientes.

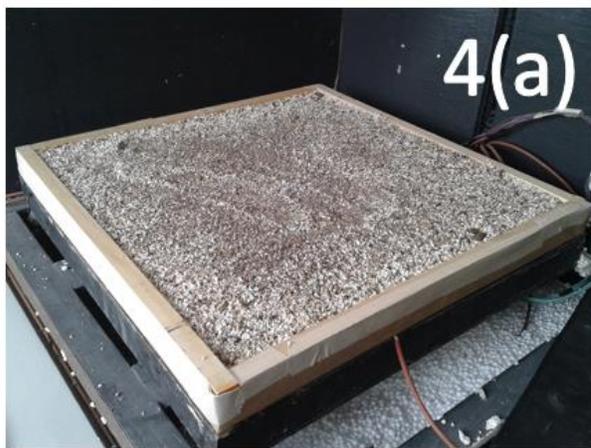
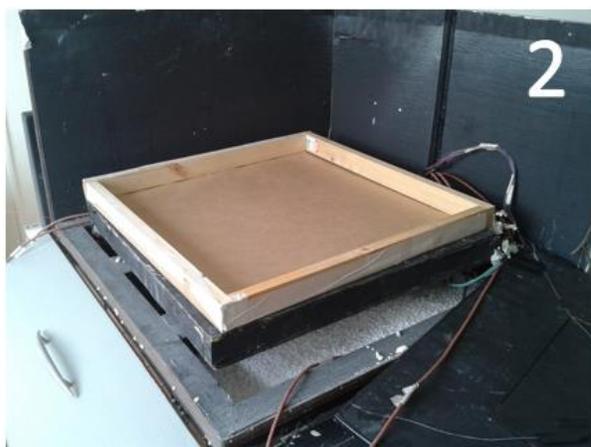


Figura 12: Secuencia de montaje, pasos 2, 3 y 4.

5. Se coloca la unidad de calentamiento formada por la placa caliente y el anillo de guarda sobre la probeta inferior.
6. Se realiza el procedimiento análogo al paso 2, 3 y 4, pero esta vez la probeta superior está en contacto con la placa caliente en la cara de abajo, donde también se colocan termocupas en el papel kraft

7. Se coloca la placa fría superior en la cara de arriba de la segunda probeta.
8. Se cierra con cuidado la máquina para posteriormente aislarla térmicamente.
9. Se llena de perlititas de poliuretano la máquina medición.
10. Se siguen constantemente el registro de las temperaturas de las placas frías y calientes hasta lograr una temperatura fija, modificando el voltaje de entrada.
11. Una vez que se logra la temperatura deseada cercana a los 15°C en las zonas de refrigeración y 25°C en las placas calientes, se comienzan a registrar y guardar los datos.
12. Se detiene la obtención de datos aproximadamente un día después de iniciado el programa de registro.
13. Se desmonta el ensayo y se prepara para el próximo sustrato a ensayar.

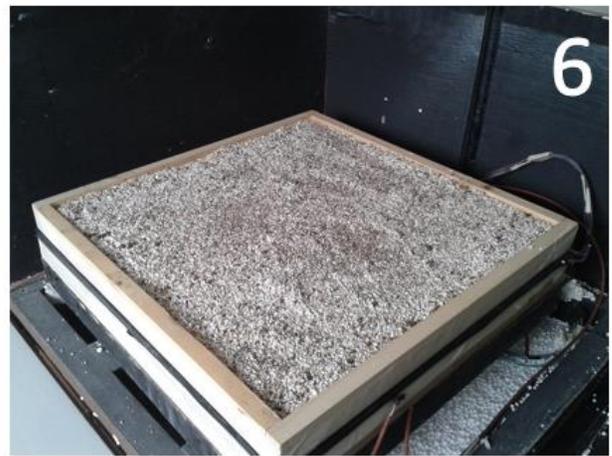
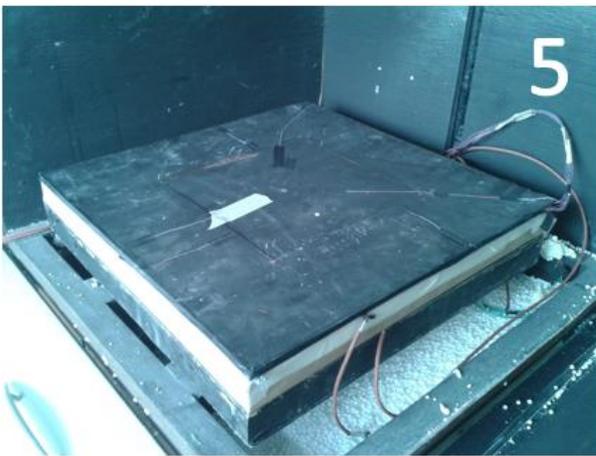


Figura 13: Secuencia de montaje, pasos 5 y 6.



Figura 14: Secuencia de montaje, Pasos 6, 7, 8 y 9.

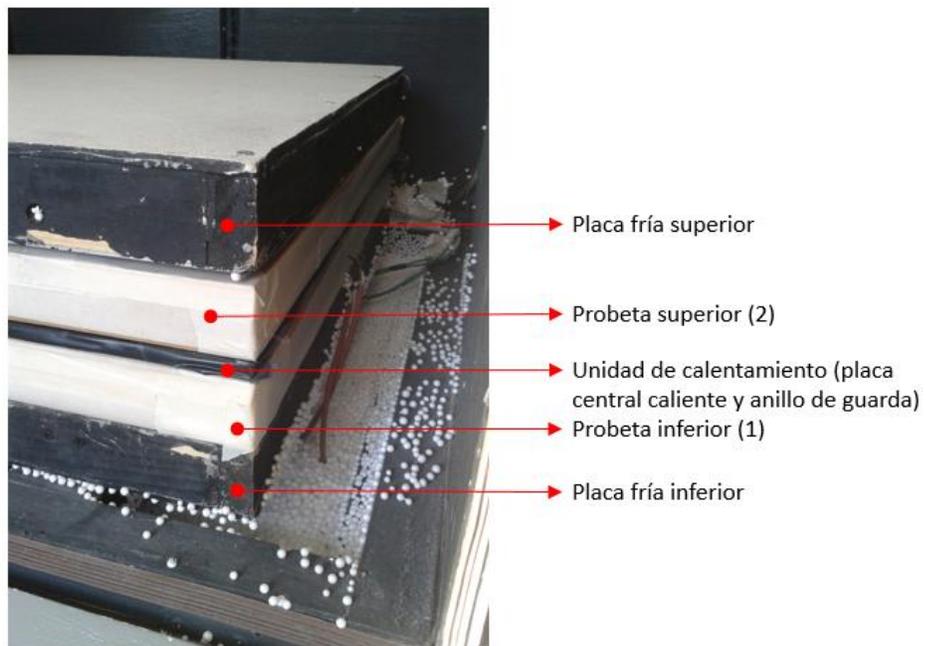


Figura 15: Esquema del montaje.

3.4.2. REGISTRO DE DATOS

Antes de verter el sustrato en los moldes, fue pesado el recipiente vacío que lo contiene. Posteriormente se toma el peso del balde lleno de mezcla, después de llenar la probeta inferior y después de llenar la superior, para así conocer el peso de material en cada una de ellas.

Tabla 5: Pesos de los sustratos en cada probeta.

Sustrato	Sustrato 1	Sustrato 2	Sustrato 3
Probeta 1 [kg]	10,185	8,254	6,768
Probeta 2 [kg]	8,718	7,761	5,830
Total Mezcla [kg]	18,903	16,015	12,598

Se tomaron 3 medidas para las dimensiones en planta de cada probeta, al centro y a los dos extremos. El espesor se midió en 3 puntos de la madera que sirvió de base para la fabricación de los moldes.

Tabla 6: Medidas de las dimensiones de los moldes de madera.

Dimensión	Probeta 1	Probeta 2
a1 [cm]	51,000	51,100
a2 [cm]	51,200	51,000
a3 [cm]	50,900	50,800
b1 [cm]	50,800	50,900
b2 [cm]	50,900	51,000
b3 [cm]	51,000	51,000
e1 [cm]	4,000	4,000
e2 [cm]	4,000	4,000
e3 [cm]	4,000	4,000

Tabla 7: Promedio de las dimensiones de los moldes.

Dimensión	Probeta 1	Probeta 2
a [m]	0,510	0,510
b [m]	0,509	0,510
e [m]	0,040	0,040
Volumen [m ³]	0,0104	0,0104

El registro de los datos para el cálculo de la conductividad térmica se realiza cada 20 segundos, y como el tiempo medio de medición es de aproximadamente un

día. En el Anexo A se muestra solo parte de los datos para los tres ensayos realizados, debido a lo extenso del registro.

El programa deja guardado en un archivo .txt los valores de temperatura registrados en las termocuplas de la cara fría de la probeta inferior, cara caliente de la probeta inferior, calefactor central, anillo de guarda, cara caliente de la probeta superior y cara fría de la probeta superior. La temperatura ambiente es controlada y mantenida en 21°C en la habitación. El voltaje y amperaje, cuya multiplicación entrega la potencia eléctrica que da el flujo térmico perpendicular a las caras de las probetas, se anota directamente del voltímetro (figura 16), cuando se ha logrado una diferencia de temperatura adecuada (entre 5 y 10°C) entre las placas frías y las calientes.



Figura 16: Voltímetro. Amperaje y voltaje del ensayo para el sustrato 2.

El procesamiento de datos se hace traspasando la información del archivo .txt a una planilla electrónica usando Excel® para así realizar el cálculo de la conductividad mediante la ecuación (1), usando como ΔT el promedio de las diferencias de temperatura entre la cara fría y caliente de ambas probetas y el área (A) de la sección central de las placas calientes igual a 0,0784m².

CAPÍTULO 4: RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

En este capítulo se muestran los resultados de los tres ensayos realizados a los sustratos mezclados.

Debido al largo de las tablas de registro, solo se muestra una parte representativa de ellas en el Anexo A, sin embargo, hay que mencionar que se usó la totalidad de los registros cuando fue alcanzada la diferencia de temperatura adecuada.

4.1. SUSTRATOS

Con los pesos de la tabla 5 y las dimensiones de la tabla 6 se puede obtener el volumen y posteriormente la densidad

Tabla 8: Densidad de los sustratos ensayados.

	Sustrato 1	Sustrato 2	Sustrato 3
Probeta 1 [kg/m ³]	980,233	794,388	651,323
Probeta 2 [kg/m ³]	839,043	746,891	561,095
Promedio [kg/m ³]	909,638	770,640	606,209

Con el foco en cubiertas del tipo extensiva, debido a la baja mantención que tienen y un costo inicial de inversión menor a los otros dos tipos de techos verdes, se hacen los cálculos para tres espesores: 5, 10 y 15 [cm], intentando representar los valores de resistencia térmica y el aporte que tienen a la envolvente térmica del edificio.

Tabla 9: Carga en [kg/m²] aportada por los tres tipos de sustratos con los tres espesores seleccionados.

	e [cm]	Sustrato 1	Sustrato 2	Sustrato 3
Carga [kg/m ²]	5,00	45,482	38,532	30,310
	10,00	90,964	77,064	60,621
	15,00	136,446	115,596	90,931

Con el registro de datos del Anexo A y la ecuación (5) se calcula la conductividad térmica de los sustratos secos:

Tabla 10: Conductividad térmica seca de los sustratos ensayados.

	Sustrato 1	Sustrato 2	Sustrato 3
λ [W/(m K)]	0,2336	0,1741	0,0509

Debido a un valor considerablemente inferior al resto de los sustratos y comparando con lo visto en Sailor & Hagos (2011) y en el I Seminario de Infraestructura Vegetada realizado por la Universidad Católica, se decide dejar de lado los resultados del sustrato 3 por considerarse poco representativo y fuera de rango.

Se calcula entonces la resistencia térmica para los sustratos 1 y 2, considerando los tres espesores anteriormente nombrados.

Tabla 11: Resistencia térmica seca de los sustratos 1 y 2 a distintos espesores.

	Espesor e [cm]	Sustrato 1	Sustrato 2
R [(m ² K)/W]	5,00	0,2141	0,2872
	10,00	0,4282	0,5744
	15,00	0,6422	0,8616

Como el sustrato de los techos vegetales prácticamente nunca se encontrará seco, es necesario conocer los valores de la conductividad térmica a distintos contenidos de humedad. En un principio se había planteado realizar un ensayo de los sustratos totalmente saturados para interpolar los valores entre 0 y 100% de contenido de humedad, pero dadas las dificultades presentes para mantener la humedad en el sustrato saturado, el difícil montaje de las probetas en estas condiciones, las precauciones en las que se tiene que incurrir para cuidar la integridad de la máquina y debido a que la humedad migra cuando se tienen distintas temperaturas en las dos caras de la probeta, se decidió finalmente no realizar el ensayo del sustrato saturado.

Según lo anterior, para solucionar la falta del valor de λ en el sustrato saturado, se pensó en interpolar a un valor al 100% del contenido de humedad considerado igual a la conductividad térmica del agua, indicado en la norma NCh853-2007 para valores a los 0 y 94°C. La temperatura media de Santiago es de 14,2°C (Tabla C.1 – Nch1079-2008), por lo que se puede interpolar para obtener un valor más representativo de la conductividad térmica del agua, como se muestra en la tabla 12.

Tabla 12: Conductividad térmica del agua.

Temperatura [°C]	λ [W/(m K)]
0	0,5900
94	0,6900
14,2	0,6051

Según los resultados de Sailor & Hagos (2011) mostrados en la figura 17, tomar el valor de λ igual a 0,6051 [W/(m°K)] sería cercano a lo expuesto en el artículo citado.

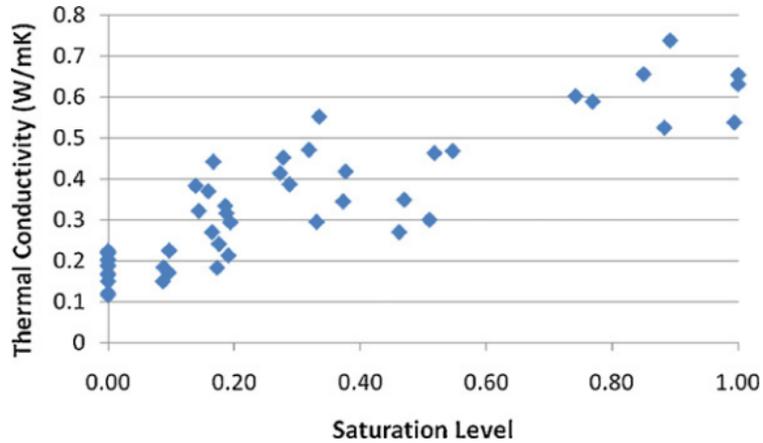


Figura 17: Conductividad térmica vs contenido de humedad. Sailor & Hagos (2011).

Se puede también verificar que los valores de las muestras secas (0% de contenido de humedad) en la figura 17 están aproximadamente entre 0,1 y 0,24 [W/(m K)], lo que valida los resultados obtenidos en el Laboratorio de Higrotermia del IDIEM.

Para realizar un cálculo más conservador y según lo visto en el I seminario de infraestructura vegetada realizado en mayo de 2014, se tomará como valor de la conductividad térmica λ igual a 0,7 [W/(m K)] para el sustrato 1 y 2 al 100% del contenido de humedad, tal y como se ve en la figura siguiente.

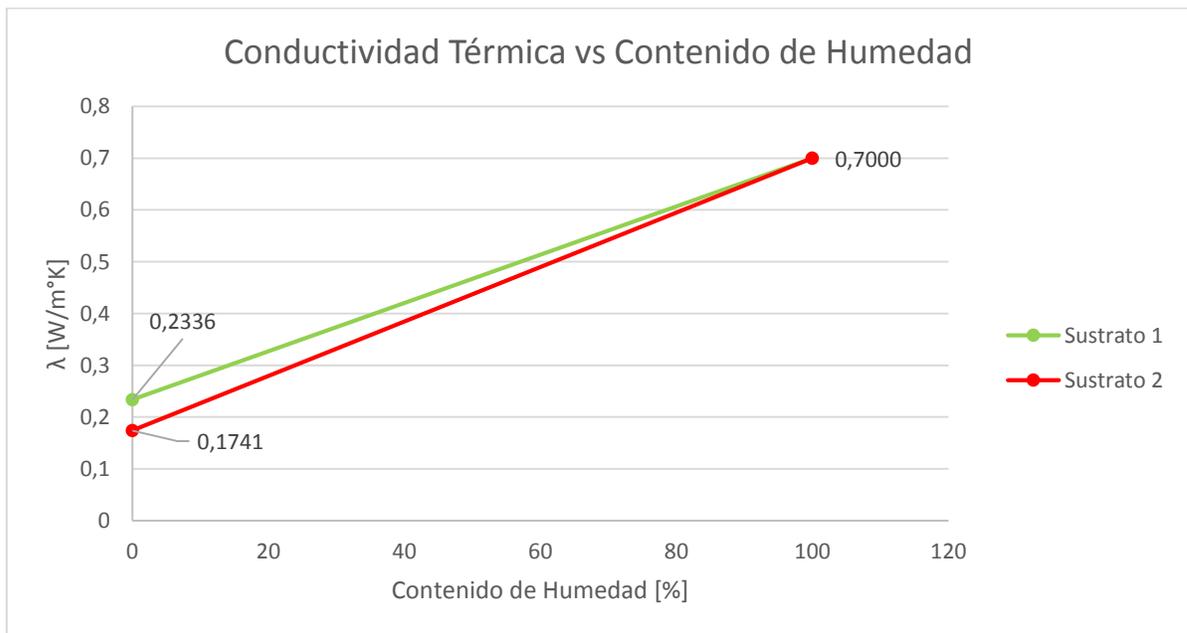


Figura 18: Conductividad Térmica vs Contenido de Humedad para los sustratos 1 y 2.

Con esto, es posible calcular la resistencia térmica de los dos sustratos, para los tres espesores y a distintos contenidos de humedad.

Tabla 13: Resistencia térmica de los sustratos con 0% de humedad.

0% de humedad	espesor [cm]	Sustrato 1	Sustrato 2
R [m² K/W]	5	0,2141	0,2872
	10	0,4282	0,5744
	15	0,6422	0,8616

Tabla 14: Resistencia térmica de los sustratos con 25% de humedad

25% de humedad	espesor [cm]	Sustrato 1	Sustrato 2
R [m² K/W]	5	0,1428	0,1636
	10	0,2856	0,3273
	15	0,4284	0,4909

Tabla 15: Resistencia térmica de los sustratos con 50% de humedad

50% de humedad	espesor [cm]	Sustrato 1	Sustrato 2
R [m² K/W]	5	0,1071	0,1144
	10	0,2142	0,2288
	15	0,3214	0,3432

Tabla 16: Resistencia térmica de los sustratos con 75% de humedad

75% de humedad	espesor [cm]	Sustrato 1	Sustrato 2
R [m² K/W]	5	0,0857	0,0879
	10	0,1714	0,1759
	15	0,2571	0,2638

Tabla 17: Resistencia térmica de los sustratos con 100% de humedad

100% de humedad	espesor [cm]	Sustrato 1	Sustrato 2
R [m² K/W]	5	0,0714	0,0714
	10	0,1429	0,1429
	15	0,2143	0,2143

El artículo 4.1.10 de la reglamentación térmica de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción (OGUC) [20] especifica en la tabla 1 las exigencias de transmitancia térmica máxima o resistencia térmica mínima para los complejos de techumbres, muros perimetrales y pisos ventilados.

Tabla 18: Valores exigidos para transmitancia y resistencia térmica según la OGUC.

Zona	Techumbre		Muros		Pisos Ventilados	
	U [W/m ² K]	R [m ² K/W]	U [W/m ² K]	R [m ² K/W]	U [W/m ² K]	R [m ² K/W]
1	0,84	1,19	4,00	0,25	3,60	0,28
2	0,60	1,67	3,00	0,33	0,87	1,15
3	0,47	2,13	1,90	0,53	0,70	1,43
4	0,38	2,63	1,70	0,59	0,60	1,67
5	0,33	3,03	1,60	0,63	0,50	2,00
6	0,28	3,57	1,10	0,91	0,39	2,56
7	0,25	4,00	0,60	1,67	0,32	3,13

Considerando la ciudad de Santiago, ubicado en la zona 3 (Figura 19, la resistencia térmica total mínima recomendada para techos es de 2,13 [(m² K)/W]. Comparando este valor con la resistencia térmica aportada por el sustrato se puede ver el porcentaje en que puede aportar el techo verde a lo exigido, sin considerar el efecto que tiene la capa de vegetación o las demás capas como la de drenaje.

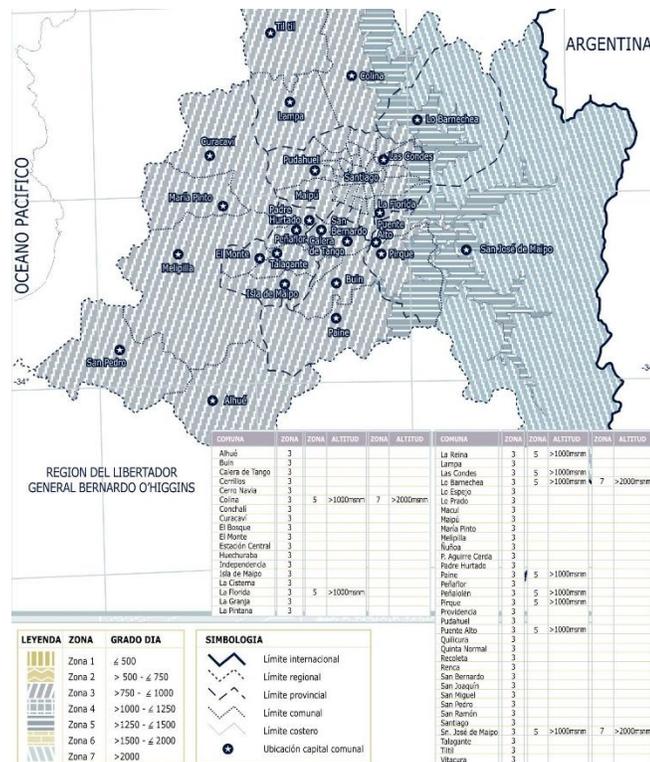


Figura 19: Zonificación térmica de la región Metropolitana (OGUC).

Tabla 19: Aporte porcentual de los sustratos a la R total recomendada por norma al 0% de humedad.

espesor [cm]	Sustrato 1	Sustrato 2
5	10%	13%
10	20%	27%
15	30%	40%

Tabla 20: Aporte porcentual de los sustratos a la R total recomendada por norma al 25% de humedad.

espesor [cm]	Sustrato 1	Sustrato 2
5	7%	8%
10	13%	15%
15	20%	23%

Tabla 21: Aporte porcentual de los sustratos a la R total recomendada por norma al 50% de humedad.

espesor [cm]	Sustrato 1	Sustrato 2
5	5%	5%
10	10%	11%
15	15%	16%

Tabla 22: Aporte porcentual de los sustratos a la R total recomendada por norma al 75% de humedad.

espesor [cm]	Sustrato 1	Sustrato 2
5	4%	4%
10	8%	8%
15	12%	12%

Tabla 23: Aporte porcentual de los sustratos a la R total recomendada por norma al 100% de humedad.

espesor [cm]	Sustrato 1	Sustrato 2
5	3%	3%
10	7%	7%
15	10%	10%

Se puede ver gráficamente lo anterior en las figuras 20 y 21:

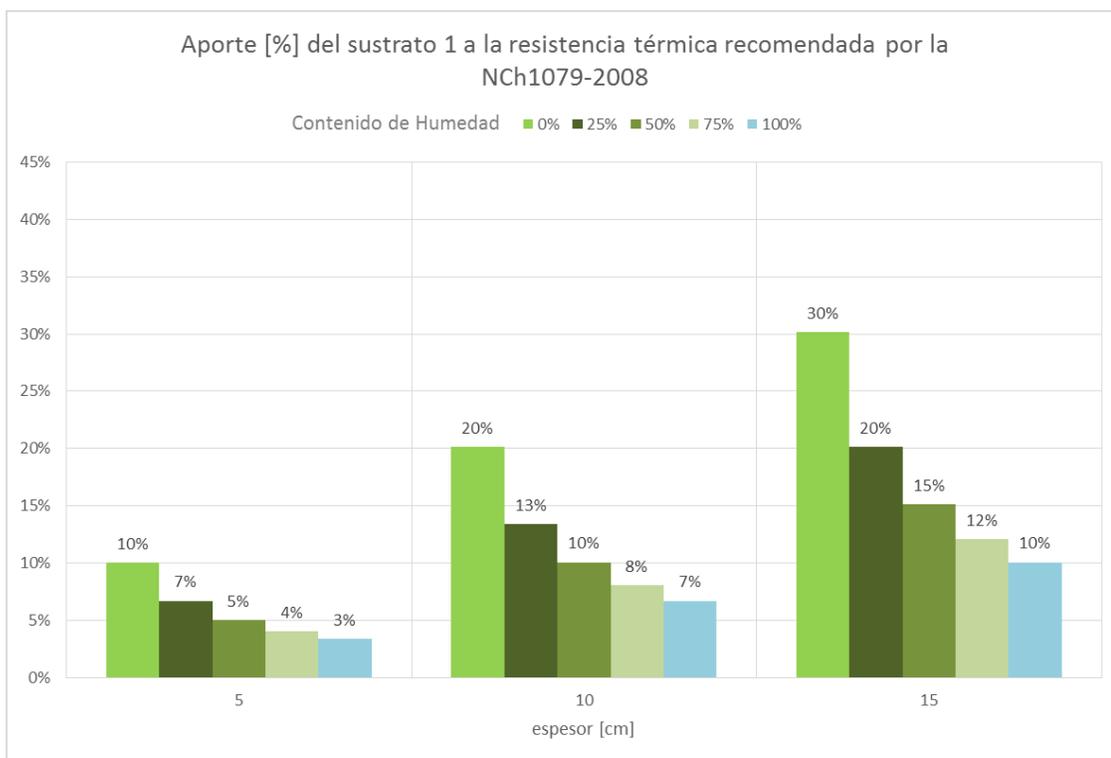


Figura 20: Aporte porcentual del sustrato 1 a la resistencia térmica recomendada en NCh1079-2008 según distintos espesores y contenidos de humedad.

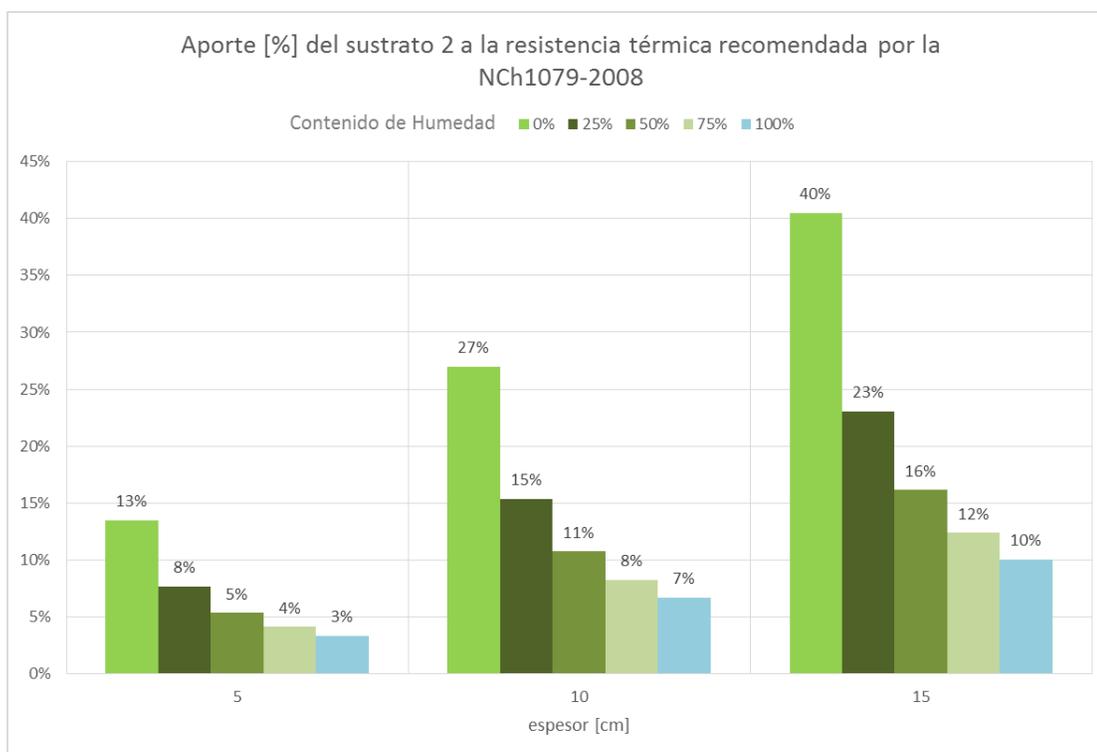


Figura 21: Aporte porcentual del sustrato 2 a la resistencia térmica recomendada en NCh1079-2008 según distintos espesores y contenidos de humedad.

CAPÍTULO 5: MODELACIÓN COMPUTACIONAL

Si bien se puede hacer una estimación del aporte de los techos y fachadas vegetales a la resistencia térmica mínima exigida por la OGUC, calcular sus efectos totales es un tema muchísimo más complejo.

Son varios los fenómenos que ocurren en una cubierta vegetal y que contribuyen a hacerlas buenas opciones para disminuir la temperatura al interior de una vivienda en condición de verano:

- 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

En la sección anterior se estimó lo que aporta el sustrato a distintos espesores y niveles de saturación a la resistencia de la envolvente, pero como se puede observar en lo antes mencionado, la capa vegetal tiene esta serie de efectos que matemáticamente son difíciles de modelar y que van de algo sencillo como evitar el soleamiento directo en los materiales debido a la presencia de hojas, a la evapotranspiración de las plantas. Actualmente se ha desarrollado un modelo computacional que permite analizar los techos verdes en base al motor de cálculo *EnergyPlus*, que puede ser usado mediante el programa *DesignBuilder* (detalles del modelo se incluye en las referencias bibliográficas).

5.1. CONSIDERACIONES DEL MODELO

Usando el programa *DesignBuilder*, en esta sección se entregan las consideraciones de modelación para el caso base y el caso con techo verde, que cumplen con las exigencias del reglamento térmico de la OGUC, es decir, con la transmitancia máxima (tabla 18) y el porcentaje máximo de superficie de ventanas, que corresponde a un 25% para la zona 3 con vidrio monolítico.

En un comienzo se pretendía modelar los efectos de las fachadas vegetales, lo cual no pudo concretarse debido a que el programa no cuenta con un módulo especial para hacerlo. Sumado a esto, textualmente⁷ en el manual de usuario se indica que “*no se recomienda para superficies exteriores con pendientes altas (por ejemplo muros)*”. Si bien se puede realizar, los desarrolladores no garantizan resultados válidos, y al probar el modelo con muros verdes, se identificaron resultados contradictorios y poco coherentes, por lo que se decidió modelar solo el efecto de los techos verdes.

⁷ "This model was developed for low-sloped exterior surfaces (roofs). It is not recommended for high-sloped exterior surfaces (e.g., walls)."

DesignBuilder permite hacer una modelación muy detallada del desempeño energético de un edificio, pudiendo configurar la zona climática, horas de sol, condiciones de lluvia, humedad del ambiente, velocidad del viento, temperaturas de la localidad, tipo de ocupantes, actividad de los ocupantes, sistemas de ventilación, sistemas de aire acondicionado, tipo de luminaria, incorporación de equipos eléctricos, entre muchas otras variables modificables.

Para efectos del modelo, como se desean ver los efectos que tienen las cubiertas vegetales, no se analizarán por separado el efecto de otras variables y se mantendrán los valores recomendados por defecto en el programa para la región escogida (Santiago de Chile), salvo lo que específicamente se detalle en la presente sección.

5.2. MODELO 1: CASA

La modelación se realiza para una vivienda ubicada en Santiago de Chile (-33,38°N; -70,78°E). Los datos de la zona climática se han obtenido de la base de datos internacional de ASHRAE⁸ (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers). Solo se han modificado las temperaturas medias mensuales según la tabla C.1 de la norma chilena NCh1079-2008 (Tabla 24).

Tabla 24: Temperatura media por mes en Santiago, Chile.

Mes	T [°C]
Ene	20,50
Feb	19,60
Mar	17,40
Abr	14,20
May	11,10
Jun	8,50
Jul	8,20
Ago	9,40
Sep	11,30
Oct	14,10
Nov	17,00
Dic	19,40

El modelo geométrico con las dimensiones de la casa se muestra en la figura 22. Los muros de la vivienda son de 2.20 [m] de altura, y su área de 48 [m²]. Cuenta con living comedor, cocina, dos dormitorios y dos baños. En *DesignBuilder*, las zonas se han escogido según la planilla por defecto, que se pueden ver en la figura 23 (flecha

⁸ ASHRAE IWECC 1.1 – Santiago, Chile. International Weather for Energy Calculations.

superior derecha indica el norte geográfico). Se consideran distintos niveles de actividad de los ocupantes, iluminación, humedad, etc. Como se ha dicho, no se modifican los valores recomendados y entregados por el programa, pues no son de utilidad para el análisis comparativo entre la casa en su caso base con techo típico y el caso con techo verde.

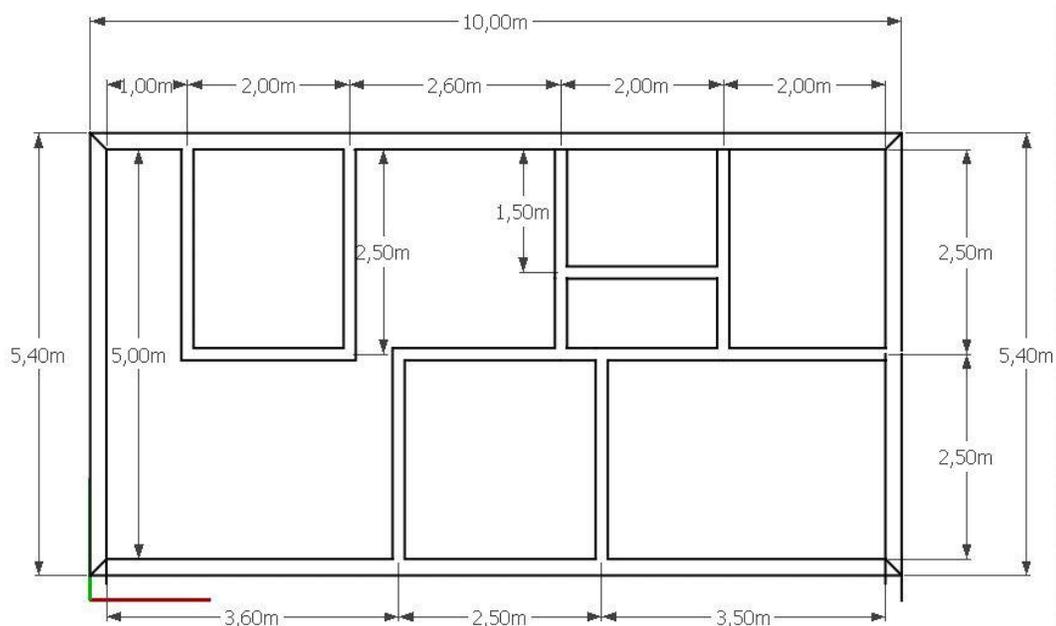


Figura 22: Plano de planta de casa. Medidas geométricas.

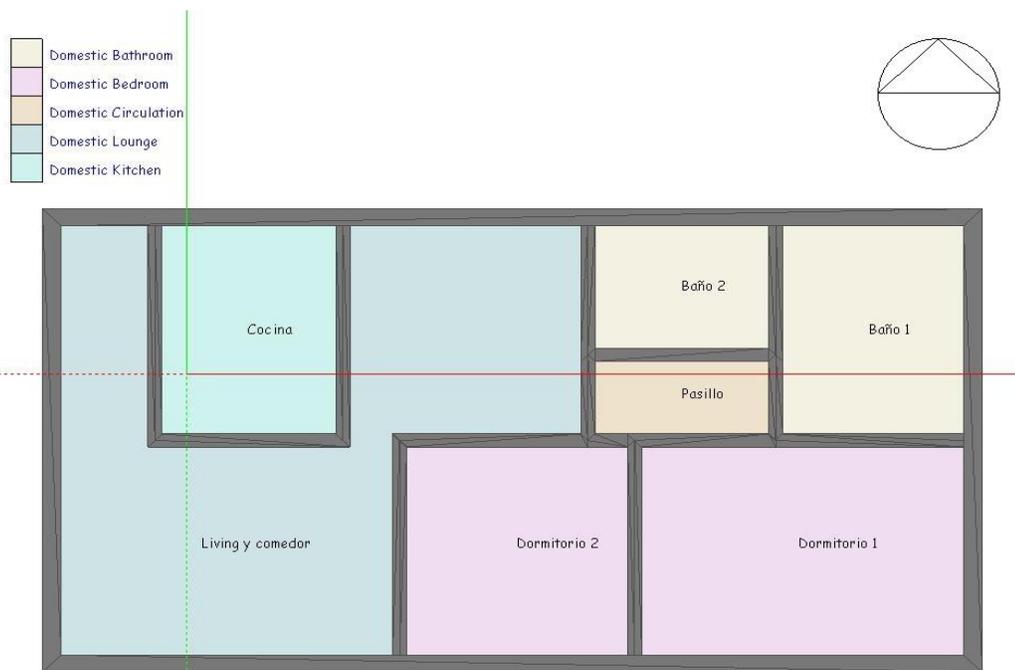


Figura 23: Plano de la casa. Zonas según DesignBuilder.

Se utiliza la biblioteca de materiales incluida, y así seleccionar los elementos que conforman el perfil de muros y techo. Es fácil comprobar el cumplimiento de exigencia térmica de los elementos de la envolvente, comparando los valores de transmitancia calculados por el programa (U-Value surface to surface) con los de la tabla 18.

Muros exteriores

El perfil del muro exterior que se utiliza en el modelo, desde la capa externa a la interna está formado por una capa de 20 [cm] de ladrillos, 2.5 [cm] de poliestireno expandido, placa de 1.5 [cm] de yeso cartón y 0.5 [cm] de enlucido de yeso.

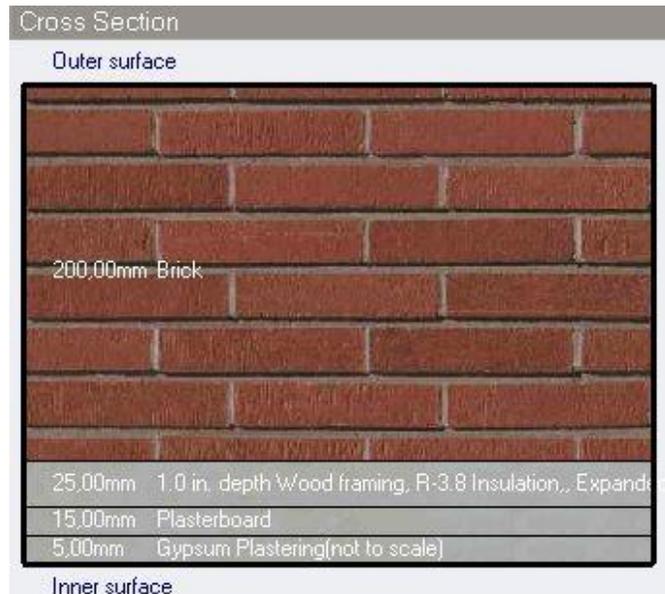


Figura 24: Perfil de muros exteriores.

Las propiedades térmicas del muro exterior quedan:

Inner surface	
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	2,152
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	5,540
Surface resistance (m ² -K/W)	0,130
Outer surface	
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	19,870
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	5,130
Surface resistance (m ² -K/W)	0,040
No Bridging	
U-Value surface to surface (W/m ² -K)	0,948
R-Value (m ² -K/W)	1,225
U-Value (W/m²-K)	0,817

Figura 25: Propiedades térmicas de muros exteriores.

Muros interiores

Para separaciones interiores se usa el perfil de muros por defecto del programa: dos capas de yeso cartón de 2.5 [cm] de espesor encerrando un aislante con huecos de aire de 10 [mm].

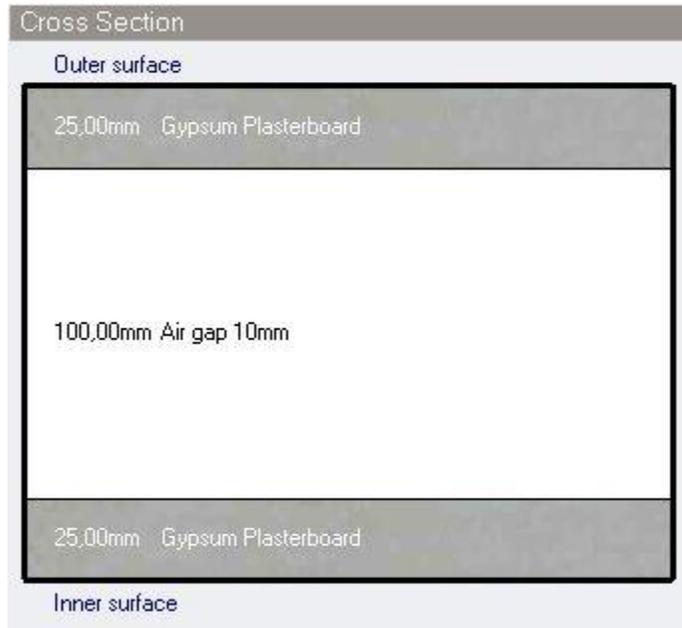


Figura 26: Perfil de muros interiores.

Las propiedades térmicas del muro interior quedan:

Inner surface	
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	2,152
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	5,540
Surface resistance (m ² -K/W)	0,130
Outer surface	
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	2,152
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	5,540
Surface resistance (m ² -K/W)	0,130
No Bridging	
U-Value surface to surface (W/m ² -K)	2,857
R-Value (m ² -K/W)	0,610
U-Value (W/m²-K)	1,639

Figura 27: Propiedades térmicas de muros interiores.

Techo tradicional

Se usa como perfil de techo tradicional, desde la capa externa a la capa interna, tejas de 2.5 [cm], aislante de lana mineral de 10 [cm], papel fieltro de 0.5 [cm] y finalmente yeso cartón de 1,5 [cm].

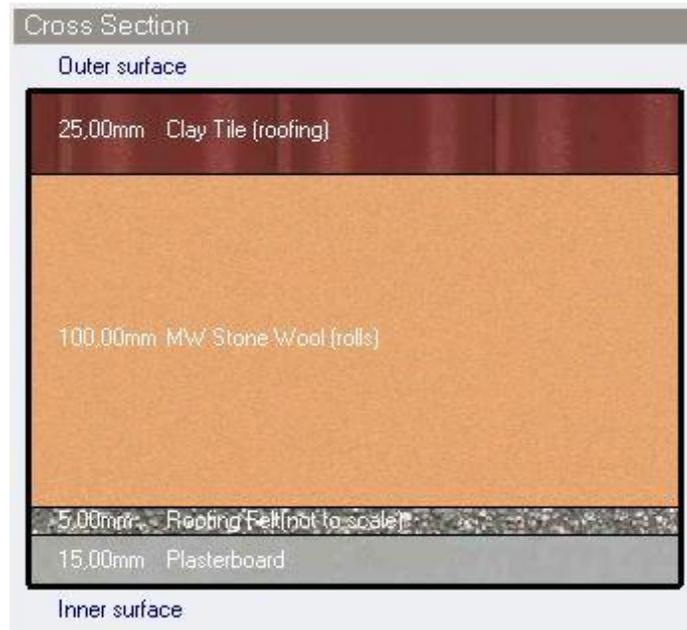


Figura 28: Perfil de techo tradicional.

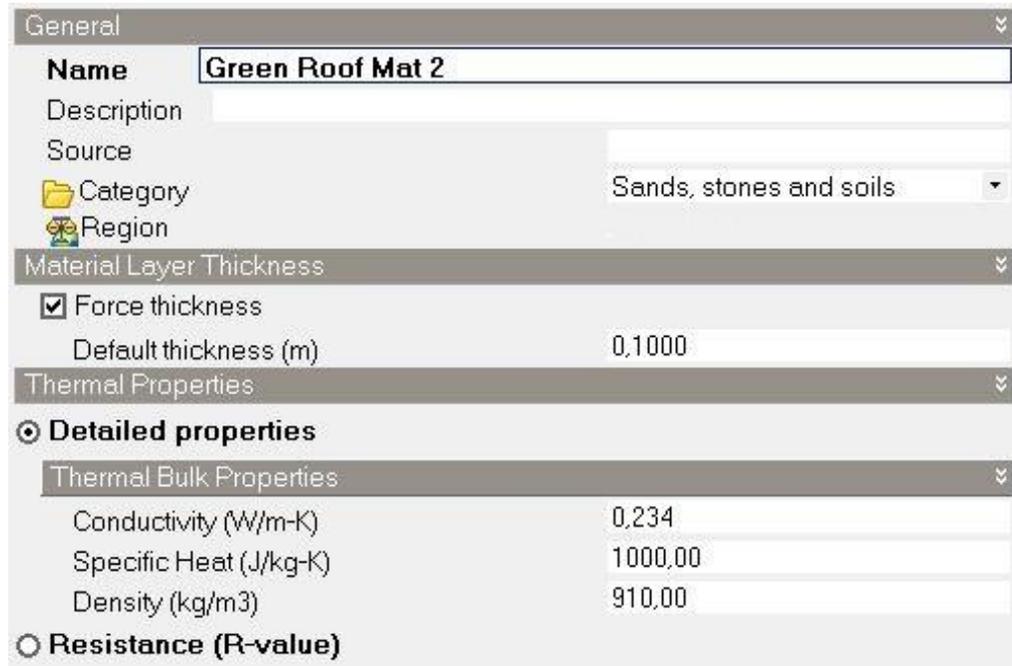
Las propiedades térmicas del techo tradicional quedan:

Inner surface	
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	4,460
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	5,540
Surface resistance (m ² -K/W)	0,100
Outer surface	
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	19,870
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	5,130
Surface resistance (m ² -K/W)	0,040
No Bridging	
U-Value surface to surface (W/m ² -K)	0,392
R-Value (m ² -K/W)	2,691
U-Value (W/m²-K)	0,372

Figura 29: Propiedades térmicas del techo tradicional.

Techo Verde

El perfil de capas se construye de forma tal que para el cálculo de la transmitancia total se consideran los valores medidos en laboratorio para el sustrato 1⁹ con 10 [cm] de espesor.



General	
Name	Green Roof Mat 2
Description	
Source	
Category	Sands, stones and soils
Region	
Material Layer Thickness	
<input checked="" type="checkbox"/> Force thickness	
Default thickness (m)	0,1000
Thermal Properties	
<input checked="" type="radio"/> Detailed properties	
Thermal Bulk Properties	
Conductivity (W/m-K)	0,234
Specific Heat (J/kg-K)	1000,00
Density (kg/m3)	910,00
<input type="radio"/> Resistance (R-value)	

Figura 30: Propiedades del sustrato del techo verde.

Se mantienen los valores por defecto entregados para la modelación de un techo verde (Figura 31). Estos parámetros corresponden a:

- High of plants: Altura de la capa vegetal.
- Leaf area index (LAI): razón entre el área de hojas proyectada por el área de la superficie de suelo.
- Leaf reflectivity: La fracción de radiación solar reflejada por cada hoja de la capa vegetal.
- Leaf emissivity: Tasa de radiación térmica emitida por las hojas.
- Stomatal resistance: Resistencia de las plantas al transporte de la humedad. Valores bajos reflejan índices altos de evapotranspiración.
- Max volumetric moisture saturation: Máximo contenido de humedad del sustrato.
- Min residual volumetric moisture content: Mínimo contenido de humedad del sustrato.

⁹ Por limitaciones del programa no se puede escoger un valor de conductividad térmica para un sustrato seco menor a 0.2 [W/m°C]. Por este motivo se modeló con los resultados obtenidos en el ensayo del sustrato 1.

- Initial volumetric moisture content: Contenido inicial de humedad en el sustrato.

En el perfil del techo verde no se considera la capa de drenaje por la forma que esta tiene y sus posibles variantes, lo que hace complicada una estimación de su aporte a la envolvente. El modelo se construye tal que garantice la transmitancia térmica máxima exigida por la OGUC (Figuras 32 y 33). Si bien, la aislación térmica es una capa adicional optativa en el perfil de un techo verde, para lograr la resistencia mínima se agrega lana mineral. Cabe señalar que no es un material usado típicamente como aislante en estas cubiertas, pero como el programa analiza y modela en base al valor de la resistencia de la envolvente, para efectos de los resultados, esto no es relevante.

Green Roof	
<input checked="" type="checkbox"/> Green roof	
Height of plants (m)	0,1000
Leaf area index (LAI)	3,5000
Leaf reflectivity	0,220
Leaf emissivity	0,950
Minimum stomatal resistance (s/m)	180,000
Max volumetric moisture content at saturation	0,500
Min residual volumetric moisture content	0,010
Initial volumetric moisture content	0,150

Figura 31: Propiedades de la capa vegetal y el sustrato del techo.

Queda conformado desde la capa más interna por una placa de yeso cartón de 1.5 [cm], losa de hormigón de 10 [cm], aislante de lana mineral de 7.5 [cm], membrana impermeable de PVC y caucho de 3 [mm], membrana anti raíces de polietileno de alta densidad de 1 [mm] de espesor y finalmente por el material del techo verde que corresponde al sustrato 1 con 10 [cm] de espesor y los efectos de la capa vegetal.



Figura 32: Perfil del techo verde.

Para el cálculo de la resistencia térmica aportada por el techo verde, el programa no considera los efectos de la capa vegetal hasta que se ejecuta la simulación para el diseño en la condición de invierno y verano.

Inner surface	
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	4,460
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	5,540
Surface resistance (m ² -K/W)	0,100
Outer surface	
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	19,870
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	5,130
Surface resistance (m ² -K/W)	0,040
No Bridging	
U-Value surface to surface (W/m ² -K)	0,401
R-Value (m ² -K/W)	2,634
U-Value (W/m²-K)	0,380

Figura 33: Propiedades térmicas del techo verde.

Los muros exteriores e interiores se mantienen iguales para el caso base sin cubierta verde y para el que lo incorpora. El único cambio es la techumbre, pasando de lo mostrado en la figura 28 a la figura 32, lo que posteriormente permite analizar los efectos en el desempeño energético de la vivienda.

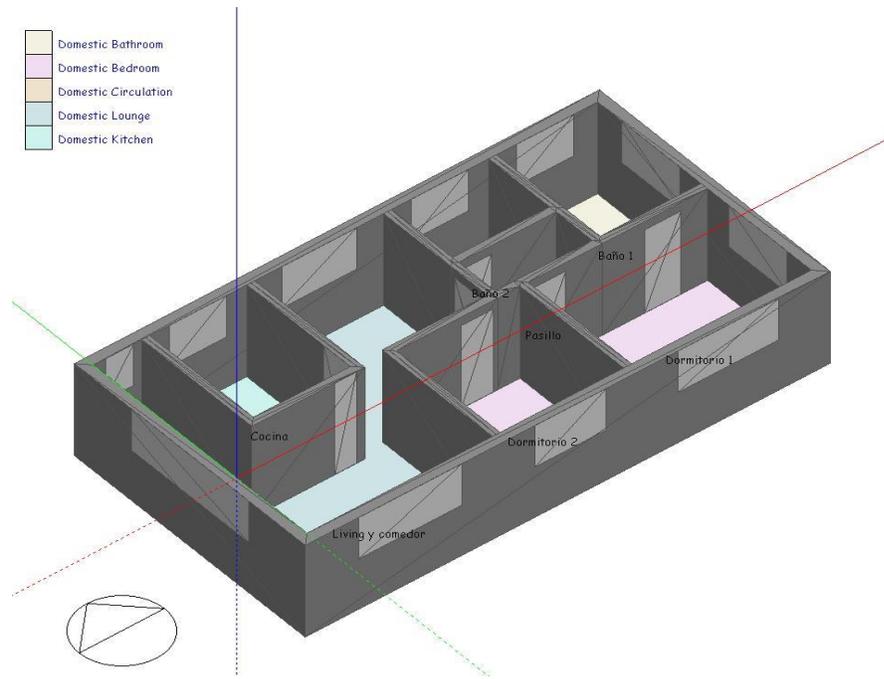


Figura 34: Muros exteriores e interiores se mantienen en ambos casos.

5.2.1. Resultados

Se ejecuta el “Heating Design” (calefacción – condición de invierno para alcanzar 18°C) y el “Cooling Design” (Refrigeración – condición de verano para alcanzar 23°C) de la vivienda, además de la simulación del comportamiento anual. El caso base con el techo tradicional (Figura 35) y la vivienda con cubierta vegetal (Figura 36) entregan los resultados que se muestran a continuación.

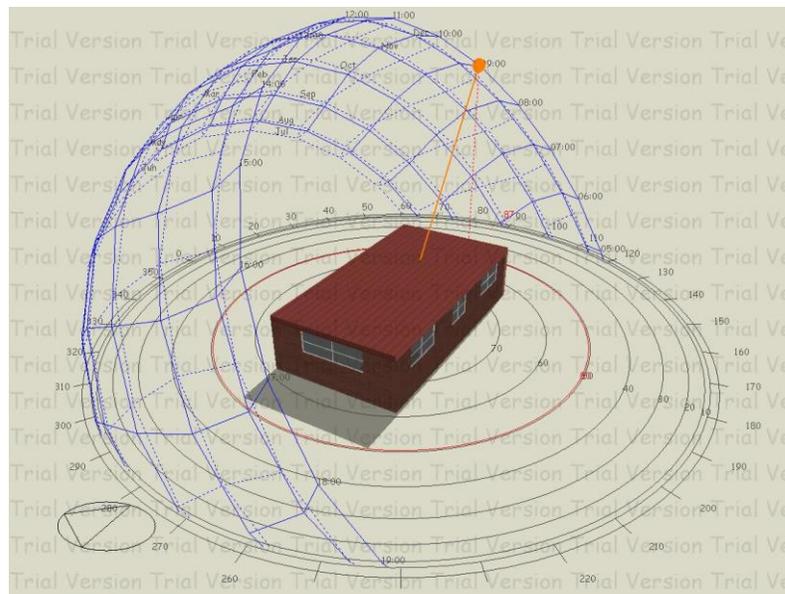


Figura 35: Esquema del caso base.

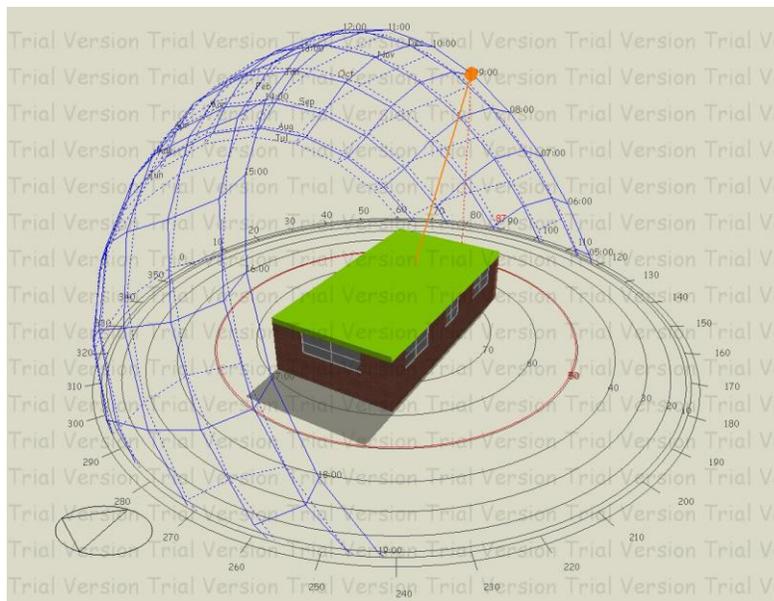


Figura 36: Esquema del caso con techo verde.

Condición de Invierno (Heating design): Se realiza el cálculo de la necesidad de calefacción de ambos casos, para alcanzar una temperatura de confort de 18°C durante esta estación, en todas las zonas de la vivienda.



Figura 37: Diseño para la condición de invierno. Casa- caso base.



Figura 38: Diseño para la condición de invierno. Casa - techo verde.

Se observa en los gráficos de la figura 37 y 38 el balance energético de la vivienda, incluyendo pérdidas de calor por ventanas, murallas, piso, particiones internas, techo, infiltraciones externas, ventilación y finalmente necesidad de calefacción. Los valores de importancia para la comparación son las pérdidas por techumbre (Roof) y el gasto energético en calefacción (Zone Sensible Heating).

Tabla 25: Balance energético para la condición de invierno. Casa - caso base y techo verde.

Balance energético	Caso base [kW]	Techo verde [kW]
Techo (Roof)	-0,34	-0,32
Calefacción (Zone Sensible Heating)	3,25	3,23

Condición de verano (Cooling Design): Se realiza el cálculo de la necesidad de refrigeración para un día de verano (se muestran los resultados para el 10 de febrero, pero la simulación posterior lo hace para la estación completa).

Tabla 26: Diseño para la condición de verano. Casa - caso base.

Zone	Total Cooling Load (kW)	Air Temperature (°C)	Time of Max Cooling	Area (m2)
Block1:Bano1	0,81	23	17:00	5,0
Block1:Dormitorio1	0,71	23	20:00	8,7
Block1:Dormitorio2	0,41	23	20:00	6,3
Block1:Bano2	0,42	23	17:00	3,0
Block1:Pasillo	0,25	23	17:00	2,0
Block1:LivingYComedor	2,01	23	17:30	18,0
Block1:Cocina	0,47	23	17:00	5,0
	5,08			48,0

Tabla 27: Diseño para la condición de verano. Casa – techo verde.

Zone	Total Cooling Load (kW)	Air Temperature (°C)	Time of Max Cooling	Area (m2)
Block1:Bano1	0,63	23	17:00	5,0
Block1:Dormitorio1	0,49	23	20:30	8,7
Block1:Dormitorio2	0,27	23	20:30	6,3
Block1:Bano2	0,33	23	17:00	3,0
Block1:Pasillo	0,19	23	17:00	2,0
Block1:LivingYComedor	1,73	23	17:30	18,0
Block1:Cocina	0,35	23	17:00	5,0
	3,99			48,0

La simulación anual de *DesignBuilder* permite obtener la energía necesaria en combustibles [kW] para el año completo, entregando los valores de calefacción (gas) en invierno y refrigeración (electricidad) en verano, representados por la barra roja (heating) y la barra azul (cooling) en las figuras 39 y 40, y resumidos en la tabla 28.

Tabla 28: Desglose del gasto energético anual de la casa.

Fuel Breakdown	Caso base[kW]	Techo verde[kW]
Cooling (Electricity)	1704,29	1417,17
Heating (Gas)	1530,68	1467,27

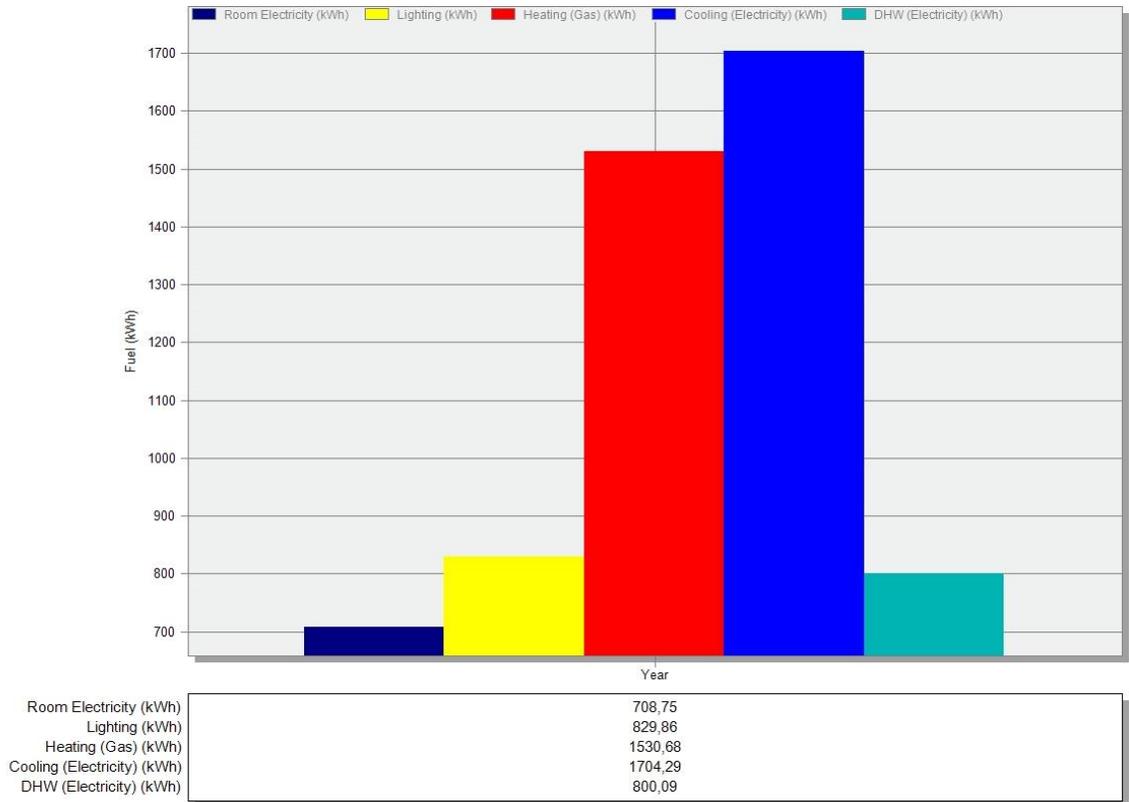


Figura 39: Gráficos del consumo energético anual. Casa – caso base.

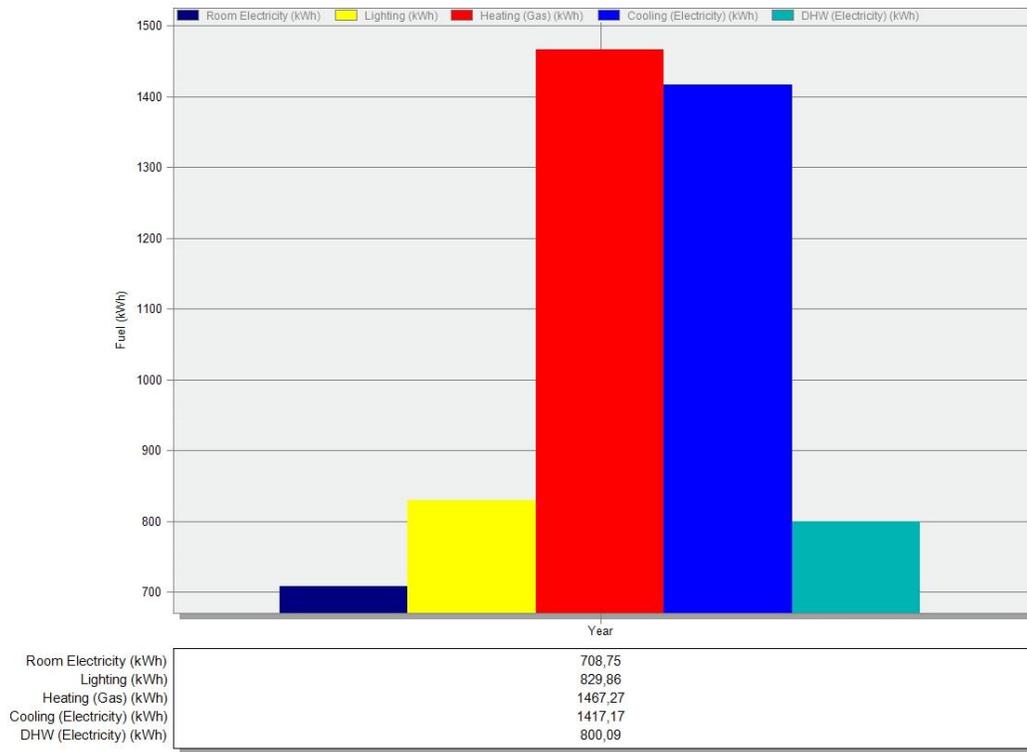


Figura 40: Gráficos del consumo energético anual. Casa - techo verde.

5.3. MODELO 2: EDIFICIO

Al igual que para el caso 1, la modelación se realiza para una vivienda ubicada en Santiago de Chile ($-33,38^{\circ}\text{N}$; $-70,78^{\circ}\text{E}$), manteniendo las mismas condiciones ya mostradas.

Debido a la licencia de estudiante de *DesignBuilder*, el programa no permite hacer los cálculos para más de 50 zonas. Por esto, se decidió simplificar el modelo, y debido a que en todas las zonas del edificio se configuró una temperatura de confort de 18°C para invierno y 23°C para verano, asumir cada departamento como una única zona definida bajo estas condiciones, es una aproximación válida para analizar los efectos de las cubiertas vegetales.

La geometría del modelo se muestra en la figura 41, un edificio de 8 pisos, con altura entre pisos de 2.20 [m]. En cada planta hay cuatro departamentos y un espacio intermedio suficiente para la caja escala y los ascensores. Los flujos térmicos entrepisos ocurren solo a través de las losas intermedias, obviando otros efectos.

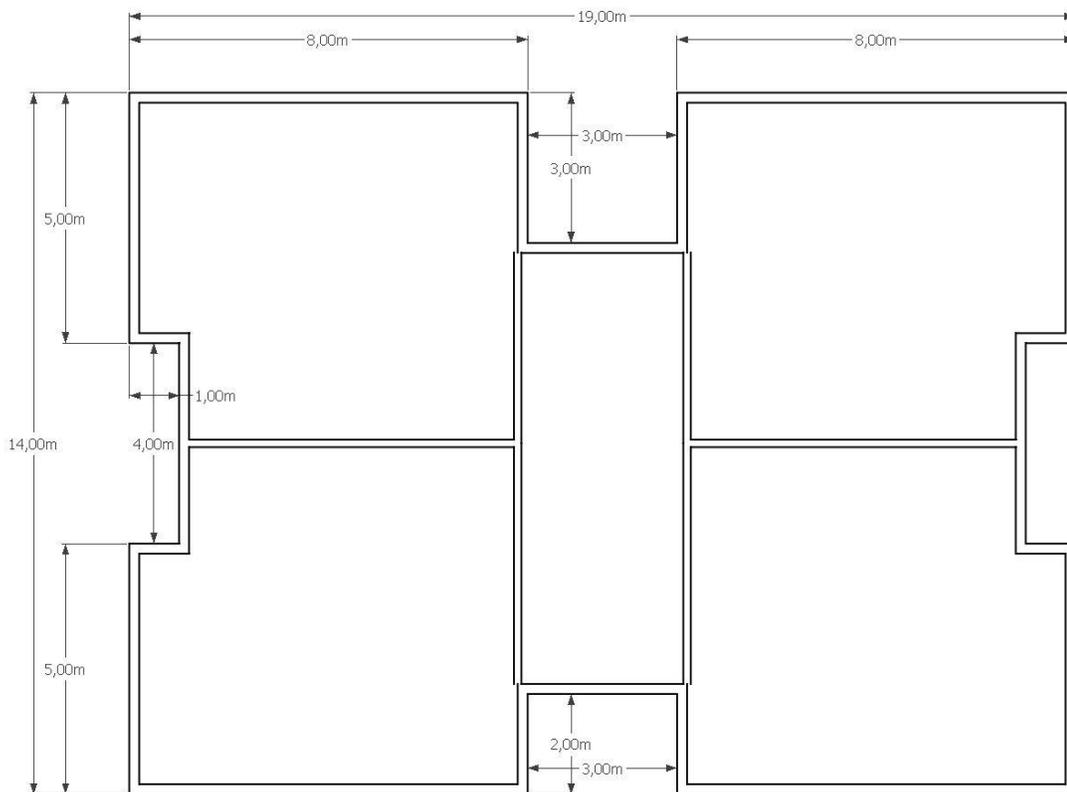


Figura 41: Dimensiones de la planta tipo del edificio.

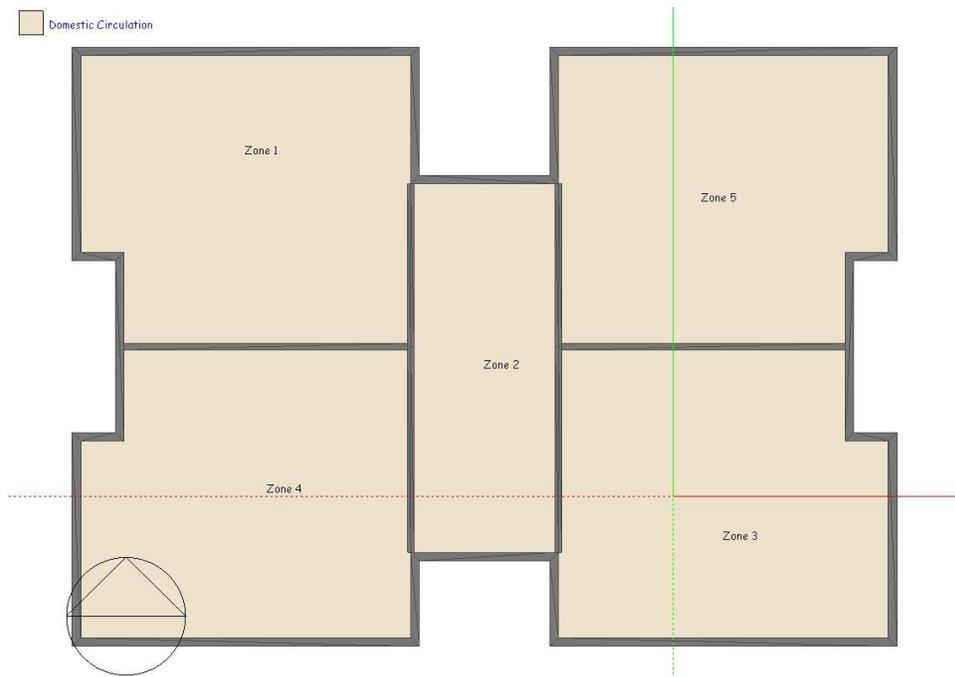


Figura 42: Planta tipo del edificio. Zonas según DesignBuilder.

Los muros exteriores, interiores y techumbre se mantienen igual que en el modelo 1. De la misma forma el único cambio ocurre en la techumbre, donde en el caso base se usa techo tradicional (figuras 28 y 29) para luego cambiarlo a techo verde (figura 32 y 33). Se agrega además las propiedades de las losas intermedias.

Losas intermedias

Se usa como losa intermedia hormigón de 15 [cm] de espesor recubierto en su cara inferior y superior por enlucido de yeso de 0.5 [cm].

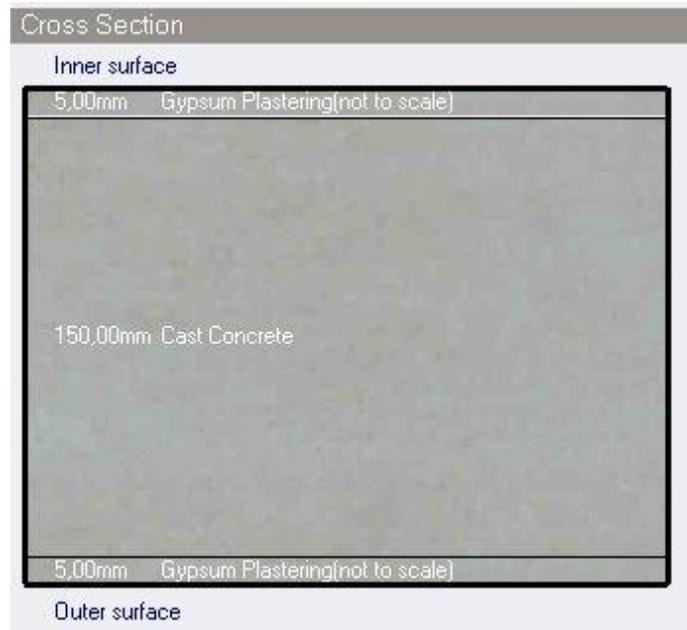


Figura 43: Perfil de losas interiores del edificio.

Las propiedades térmicas de las losas intermedias quedan:

Inner surface	
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	0,342
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	5,540
Surface resistance (m ² -K/W)	0,170
Outer surface	
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	4,460
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	5,540
Surface resistance (m ² -K/W)	0,100
No Bridging	
U-Value surface to surface (W/m ² -K)	6,339
R-Value (m ² -K/W)	0,428
U-Value (W/m²-K)	2,338

Figura 44: Propiedades térmicas de losas interiores.

5.3.1. Resultados

Se corre en *DesignBuilder* el “Heating Design” (calefacción – condición de invierno para alcanzar 18°C) y el “Cooling Design” (Refrigeración – condición de verano para alcanzar 23°C) del edificio, además de la simulación del comportamiento anual. El caso base con el techo tradicional (Figura 45) y la vivienda con cubierta vegetal (Figura 46) entregan los resultados que se muestran a continuación.

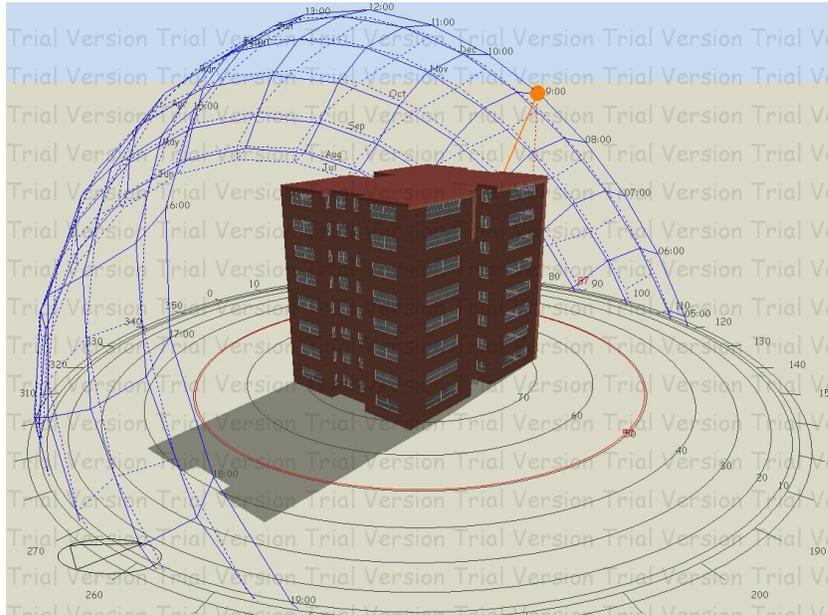


Figura 45: Esquema del edificio - caso base.

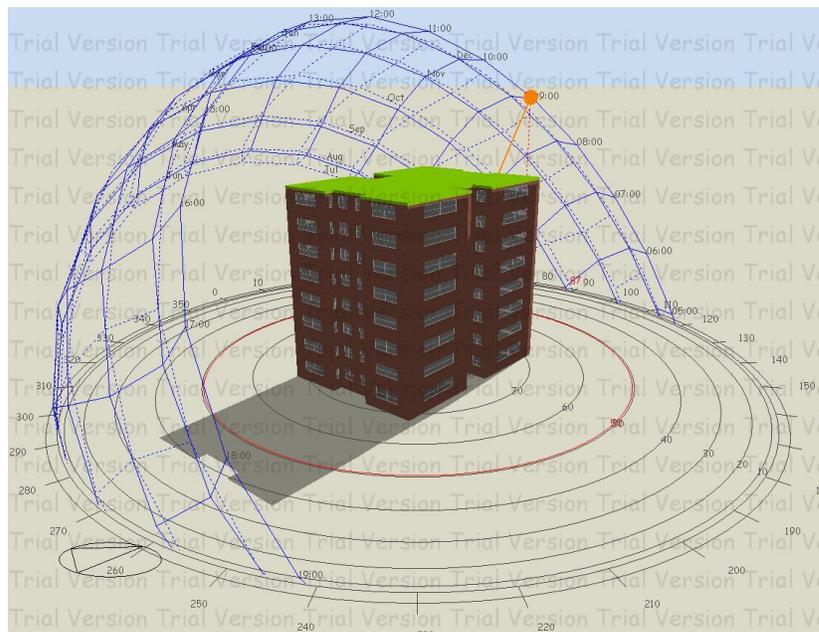


Figura 46: Esquema del edificio - techo verde.

Condición de Invierno (Heating design): Se realiza el cálculo de la necesidad de calefacción de ambos casos, para alcanzar una temperatura de confort de 18°C durante esta estación.

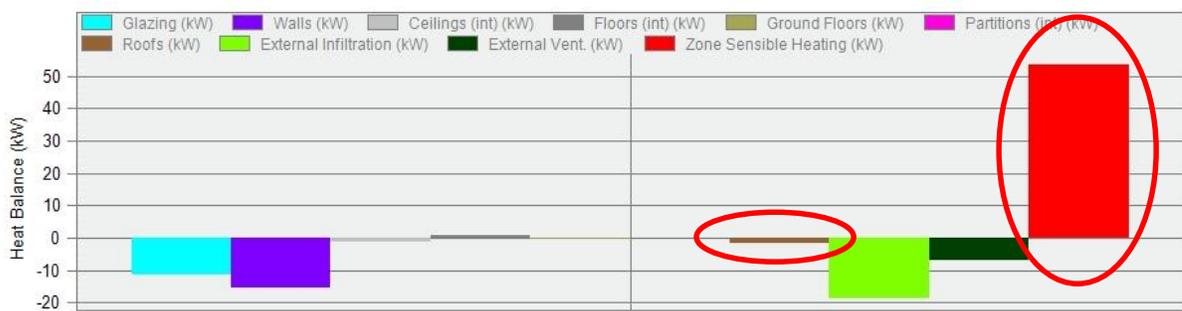


Figura 47: Diseño para la condición de invierno. Edificio - caso base.

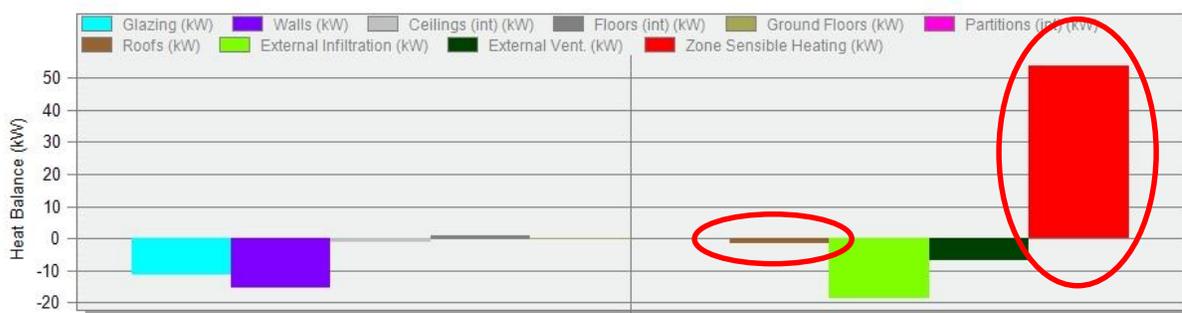


Figura 48: Diseño para la condición de invierno. Edificio - techo verde.

Se observa en los gráficos de la figura 47 y 48 el balance energético del edificio. Los valores de importancia para la comparación son las pérdidas por techumbre (Roof) y el gasto energético en calefacción (Zone Sensible Heating), destacados en ambas figuras.

Tabla 29: Balance energético para la condición de invierno. Edificio - caso base y techo verde.

Balance energético del edificio	Caso base [kW]	Techo verde [kW]
Techo (Roof)	-1,55	-1,43
Calefacción (Zone Sensible Heating)	53,52	53,41

Condición de verano (Cooling Design): Se realiza el cálculo de la necesidad de refrigeración para un día de verano (se muestran los resultados para el 10 de febrero, pero la simulación posterior lo hace para la estación completa).

Tabla 30: Diseño para la condición de verano. Edificio, piso 7 - caso base.

Zone	Total Cooling Load (kW)	Air Temperature (°C)	Time of Max Cooling	Area (m2)
Block7:Zone5	2,21	23	17:30	49,5
Block7:Zone3	1,85	23	17:30	49,5
Block7:Zone2	0,82	23	17:30	29,2
Block7:Zone4	2,04	23	17:30	49,5
Block7:Zone1	2,41	23	17:30	49,5
TOTAL	9,33			227,2

Tabla 31: Diseño para la condición de verano. Edificio, piso 7 – techo verde.

Zone	Total Cooling Load (kW)	Air Temperature (°C)	Time of Max Cooling	Area (m2)
Block7:Zone5	2,19	23	17:30	49,5
Block7:Zone3	1,83	23	17:30	49,5
Block7:Zone2	0,81	23	17:30	29,2
Block7:Zone4	2,03	23	17:30	49,5
Block7:Zone1	2,4	23	17:30	49,5
TOTAL	9,26			227,2

Tabla 32: Diseño para la condición de verano. Edificio, piso 8 - caso base.

Zone	Total Cooling Load (kW)	Air Temperature (°C)	Time of Max Cooling	Area (m2)
Block8:Zone5	3,25	23	17:30	49,5
Block8:Zone3	2,77	23	17:30	49,5
Block8:Zone2	1,35	23	17:30	29,2
Block8:Zone4	2,96	23	17:30	49,5
Block8:Zone1	3,36	23	17:30	49,5
TOTAL	13,69			227,2

Tabla 33: Diseño para la condición de verano. Edificio, piso 8 – techo verde.

Zone	Total Cooling Load (kW)	Air Temperature (°C)	Time of Max Cooling	Area (m2)
Block8:Zone5	2,37	23	17:30	49,5
Block8:Zone3	1,97	23	17:30	49,5
Block8:Zone2	0,89	23	17:30	29,2
Block8:Zone4	2,18	23	17:30	49,5
Block8:Zone1	2,52	23	17:30	49,5
TOTAL	9,93			227,2

En los últimos dos pisos donde es posible observar mayores diferencias comparando el caso base con el de techo verde, por lo que se muestran solo para ellos los valores del diseño para la condición de verano (tabla 30 a 33), adjuntando en el Anexo B el resto de los pisos donde la variación es prácticamente despreciable.

Con la simulación anual se obtiene la energía necesaria en combustibles [MWh] para el año completo, entregando los valores de calefacción (gas) en invierno y refrigeración (electricidad) en verano (figuras 49 y 50), resumidos en la tabla 34.

Tabla 34: Desglose del gasto energético anual del edificio.

Fuel Breakdown	Caso base[MWh]	Techo verde[MWh]
Cooling (Electricity)	30,58	29,50
Heating (Gas)	21,18	20,76

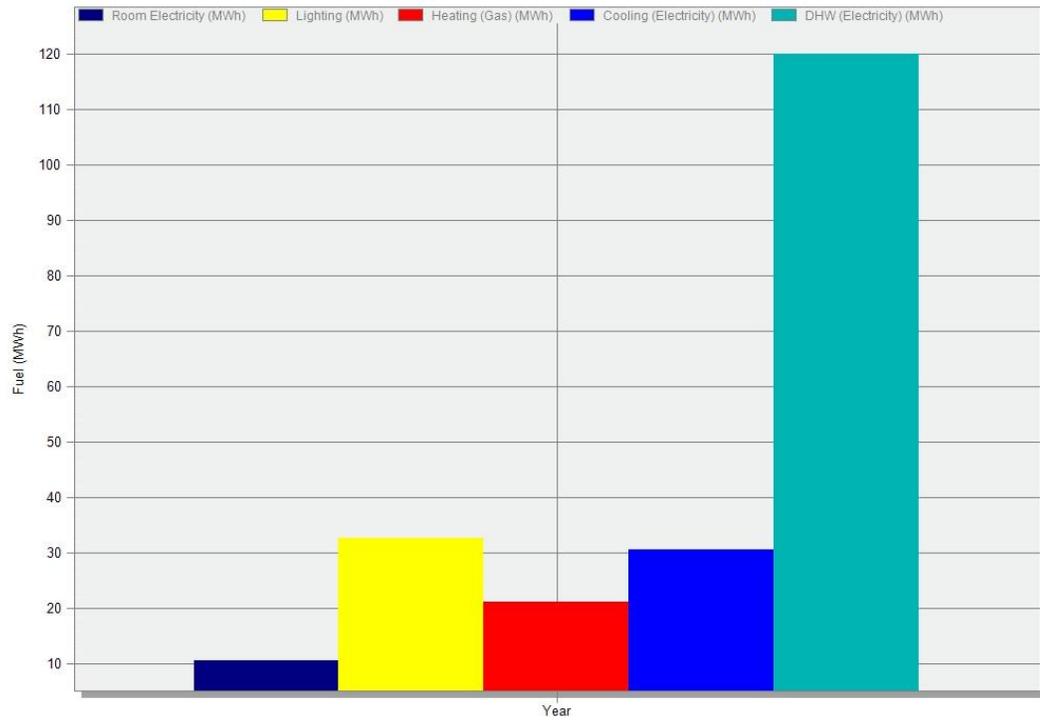


Figura 49: Gráfico del balance energético anual. Edificio – caso base.

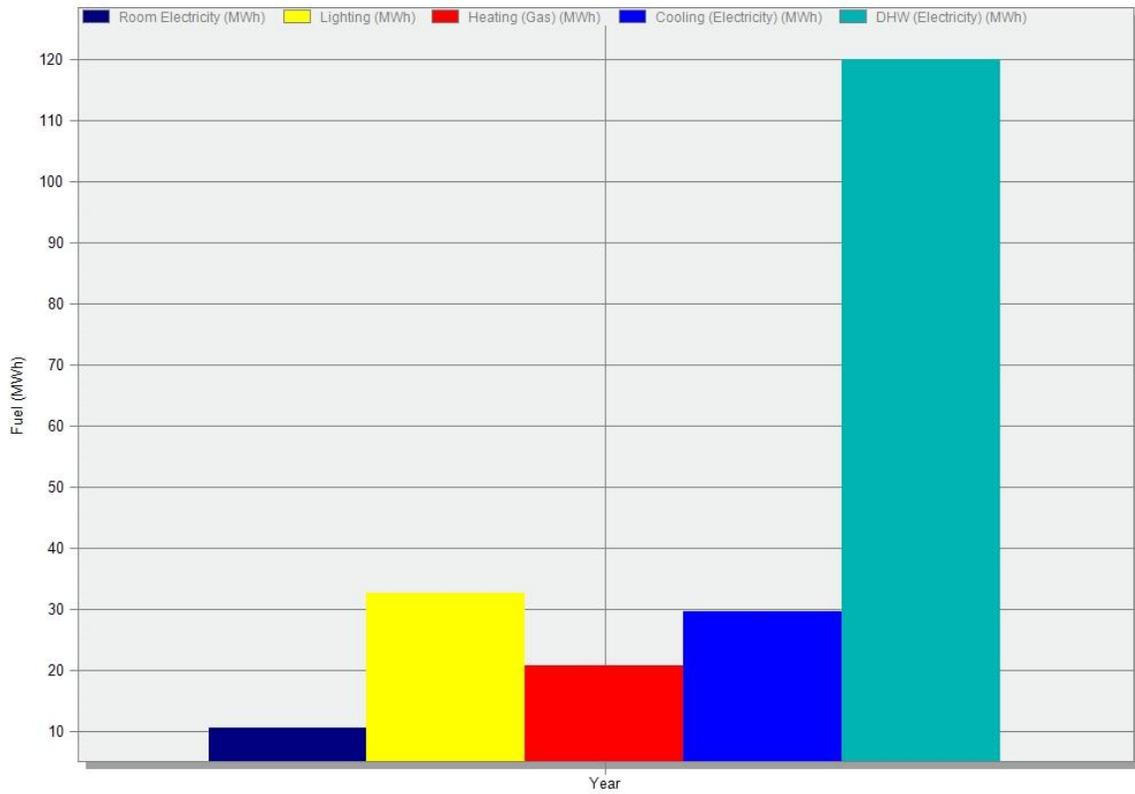


Figura 50: Gráfico del balance energético anual. Edificio – Techo verde.

5.4. ANALISIS DE RESULTADOS

A continuación, se hace un análisis comparativo de los resultados obtenidos para el modelo 1 y el modelo 2, considerando el caso base ya descrito y el caso con techo verde.

5.4.1. MODELO 1: CASA

De las figuras 37 y 38 se obtienen los datos mostrados en la tabla 25. De estos resultados, se puede ver que la variación del requerimiento de calefacción para invierno (zone sensible heating) baja de 3.25 [kW] a 3.23 [kW] si se utiliza techo verde, lo que se traduce en una disminución del 0.62%.

Las pérdidas de calor en la techumbre pasan de -0.34 [kW] para el caso base a -0.32 [kW] cuando hay techo verde, lo que implica una disminución en los flujos de un 5.88%.

Tabla 35: Comparación entre las pérdidas por techo y el gasto energético en calefacción. Modelo 1 – casa.

Balance energético	Caso base [kW]	Techo verde [kW]	Δ [%]
Techo (Roof)	-0,34	-0,32	5,88%
Gasto en calefacción (zone sensible heating)	3,25	3,23	0,62%

En el caso del diseño para la condición de verano, el cambio es mucho mayor, pudiendo observar de la serie de resultados de las tablas 26 y 27 que la carga necesaria para lograr la temperatura de confort baja de 5.08 [kW] a 3.99 [kW], lo que implica una disminución de un 21,46%.

Tabla 36: Comparación entre la carga total de enfriamiento. Modelo 1 – casa

	Caso base [kW]	Techo verde [kW]	Δ [%]
Total Cooling Load	5,08	3,99	21,46%

Estos resultados son para la modelación de un día de verano, en este caso se usó el 10 de febrero. Debido a los cambios de la posición solar, las ganancias térmicas por soleamiento son distintas en cada día del año, por lo que este valor no representa a todos los días de la estación.

Por lo anterior, se realiza la simulación del comportamiento energético anual de la casa, resultados que se ven en la tabla 28, donde se puede observar una disminución para la condición de verano de 1704.29 [kW] a 1417.17 [kW], que se traduce en una diferencia del 16.85%, lo que es menor al 21.46% mostrado para el día

en particular antes mencionado. Para el caso de invierno ocurre algo semejante, por lo que la simulación anual permite ver una disminución del gasto en calefacción de 1530.68 [kW] a 1467.27 [kW], bajando en un 4.14%.

En total, la diferencia entre la energía necesaria para mantener la casa a las temperaturas de 18°C en invierno y 23°C en verano es de un 20.99%.

Tabla 37: Comparación entre el gasto energético anual. Modelo 1 – casa

Fuel Breakdown	Caso base [kW]	Techo verde [kW]	Δ [%]
Cooling (Electricity)	1704,29	1417,17	16,85%
Heating (Gas)	1530,68	1467,27	4,14%
TOTAL			20,99%

5.4.2. MODELO 2: EDIFICIO

De los gráficos de las figuras 47 y 48, resumidos para comparar en la tabla 29, se observa una variación mínima en la necesidad de calefacción en invierno, que llega a un 0.21% cuando las pérdidas por el techo del edificio disminuyen en un 7.74%.

Tabla 38: Comparación entre las pérdidas por techo y el gasto energético en calefacción. Modelo 2 – edificio

Balance energético	Caso base [kW]	Techo verde [kW]	Δ [%]
Techo (Roof)	-1,55	-1,43	7,74%
Gasto en calefacción (zone sensible heating)	53,52	53,41	0,21%

En el caso del diseño para la condición de verano se puede observar una variación en el piso 7 que llega a un 0.75%, mientras que en el último nivel (piso 8) disminuye la carga energética para llevarlo a la temperatura de confort de 13.69 [kW] a 9.93 [kW], que se traduce en una baja de 27.47%.

Como la diferencia en los pisos inferiores del edificio fue entre 0.23% - 0.34% (ver Anexo B), lo que podría despreciarse. En este capítulo solo se incluyen los resultados y el análisis comparativo para los últimos dos pisos, que si mostraron una diferencia considerable.

Tabla 39: Comparación entre la carga total para enfriar. Modelo 2 – Piso 7 del edificio

	Caso Base [kW]	Techo Verde [kW]	Δ [%]
Total Cooling Load	9,33	9,26	0,75%

Tabla 40: Comparación entre la carga total para enfriar. Modelo 2 – piso 8 del edificio

	Caso base [kW]	Techo verde [kW]	Δ [%]
Total Cooling Load	13,69	9,93	27,47%

Finalmente con la modelación anual resumida en la tabla 34 se obtiene la diferencia en el consumo de energía anual del edificio para ambas condiciones de diseño, invierno y verano en el caso base y el caso con techo verde. Se ve una disminución de 3.53% en el gasto de electricidad para enfriar y de 1.98% en el gasto para calefaccionar. En conjunto, el consumo energético del edificio completo baja en un 5.51% comparado con el caso base, solo instalando techos verdes.

Tabla 41: Comparación entre el gasto energético anual. Modelo 2 – edificio

Fuel Breakdown	Caso base [MWh]	Techo verde [MWh]	Δ [%]
Cooling (Electricity)	30,58	29,50	3,53%
Heating (Gas)	21,18	20,76	1,98%
TOTAL			5,51%

CAPÍTULO 6: BENEFICIOS DE LAS CUBIERTAS VEGETALES

Los techos y fachadas vegetales pueden ser más caros en la etapa de construcción que las techumbres y terminaciones de muros tradicionales. Sin embargo, quedarse solo con la comparación de costos es un análisis muy básico, considerando la gran cantidad de otros beneficios que trae la instalación de estos sistemas en casas y edificios, y no solo a la vivienda misma en donde son construidos, sino que también contribuyen a mejoras en la calidad de vida de las ciudades.

6.1. Aumento de áreas verdes

Las actuales ciudades han reemplazado áreas que antiguamente albergaban flora y vida silvestre autóctona por materiales de construcción. Santiago de Chile posee en promedio solo 4m² de vegetación por habitante, siendo recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMG) un mínimo de 9m², y 16m² como lo ideal según las Naciones Unidas (ONU). Al reemplazar la techumbre típica con algún tipo de vegetación, se recobra en parte el área verde que se ha perdido, pudiendo llegar a una recuperación completa e incluso ir un paso más allá si se incluye en el diseño el uso de fachadas vegetales. De esta forma, las ciudades pueden acercarse a un equilibrio natural y no forzado por la enorme cantidad de construcciones y la sobrepoblación de habitantes.

6.2. Mejoras en el ciclo del dióxido de carbono y en la calidad del aire

La fotosíntesis de las plantas requiere de dióxido de carbono (CO₂), uno de los gases que genera contaminación en el aire y el principal contribuyente del calentamiento global por efecto invernadero. Es por ello que plantando los techos y fachadas, se aumenta la cantidad de áreas verdes generando un mejor equilibrio en el ciclo de CO₂, una mejoría en la calidad del aire de la ciudad y a largo plazo podría contribuir a disminuir las altas temperaturas del planeta causadas por este fenómeno tan perjudicial.

6.3. Reducción del efecto isla de calor

El efecto de isla de calor, como muchos autores mencionan (Oke, 1987 [19]; Oberndorfer et al., 2013 [18]; Getter and Rowe, 2006 [10]), es producido por la sustitución de la superficie natural de la zona por materiales típicos de construcción, los que al tener una considerable mayor inercia térmica, superficies impermeables y más oscuras, aumentan la temperatura de los centros urbanos comparándolas con zonas suburbanas y rurales de sus alrededores, llegando a registros de incrementos en hasta 9°C en ciudades como Berlín (Von Stulpnagel et al., 1990 [25]).

Es por esto, que los techos y fachadas verdes reducen el efecto isla de calor al recuperar las áreas verdes sustituidas por otros materiales, específicamente pétreos.

6.4. Manejo y retención de escorrentías de aguas lluvia

Como las superficies de las ciudades suelen ser impermeables generan un rápido flujo de agua y prácticamente nula retención. Producto de esto se generan inundaciones y anegaciones de calles en época de lluvias, donde basta ver el caso de Santiago. Los techos verdes pueden retener en un comienzo, casi la totalidad del agua caída (Getter et al., 2007 [11]; Getter and Rowe, 2006 [10]; Moran et al., 2004 [16]) y disminuyen los flujos liberados por los edificios en valores por sobre el 50% (Moran et al., 2004 [16]), siendo este uno de los principales factores que ha llevado a las actuales políticas de incentivo en su uso en ciudades de Europa y Norteamérica.

6.5. Contribución a la biodiversidad y vida silvestre

Al recrear un hábitat natural sirven de albergue para pequeñas especies de aves e insectos, restableciendo en parte ecosistemas que habían sido eliminados de la ciudad.

Se debe señalar que actualmente hay una alarmante disminución mundial de abejas melíferas, insectos que polinizan un alto porcentaje de la flora agrícola y frutícola. En Chile, cada año existe una reducción estimada por seremi de Agricultura de la región de la Araucanía, de entre un 30 y 50% en la población apícola producto de enfermedades, falta de nutrición, deforestación, cambio de cultivos y por químicos utilizados en el control de plagas.

Al proveer nuevos espacios verdes en la ciudad en los que se puede incluir plantas melíferas, aportando al hábitat y mantenimiento de las abejas, fomentar la utilización de cubiertas vegetales en techumbres es una opción que ya se aplica en países desarrollados y que aporta significativamente a la solución de este problema.

6.6. Aislación acústica

Aportan en este aspecto debido a la capacidad que tienen de absorber las ondas sonoras de alta y baja frecuencia, estas últimas en general, no suelen ser bien aisladas por el hormigón u otros materiales de similares características. La porosidad del sustrato y la capa vegetal le entregan a las cubiertas verdes este beneficio (I Seminario internacional de Infraestructura Vegetal de Edificios: Experiencia internacional y nacional, Maureen Connelly, PUC 2014 [24]). Además, se estima que gran parte del stress del hombre de la ciudad se debe al ruido que hay en ella.

6.7. Mejor desempeño térmico de los edificios

La sombra producida por la capa vegetal detiene el soleamiento directo en techos y muros, generando una disminución en la temperatura de la capa de aire y la superficie exterior de la envolvente de casas y edificios.

La evapotranspiración de las plantas requiere de energía, proporcionada fundamentalmente por la radiación solar y, en menor grado, por el calor presente en el aire circundante, provocando que la capa de aire entre las plantas y la superficie del sustrato se encuentren a una temperatura menor que la del aire sobre la capa vegetal.

El sustrato también funciona como un aislante debido a su porosidad, huecos de aire y espesor considerable, siendo efectivo tanto en verano como en invierno. El resto de las capas de los techos y muros verdes suele considerarse como despreciables en términos de su aporte a la resistencia térmica del sistema, debido a que sus espesores son mínimos¹⁰.

6.8. Aumento en la vida útil de las cubiertas

La vida útil de los techos verdes se estima entre 40 y 55 años (Kosareo & Ries, Saiz et al. y Clark et al. citados en Bianchini & Hewage, 2012 [1]), mayor al de las cubiertas típicas. Debido a la disminución de las fluctuaciones de temperatura en los materiales que forman parte de los elementos estructurales del cielo de un edificio, estos quedan sometidos a un estrés térmico considerablemente menor que de no existir estas cubiertas, extendiendo la vida útil entre dos y tres veces (Peck & Associates, 1999, citado en Getter & Rowe, 2006 [10]).

6.9. Estética

Junto con un buen diseño paisajístico y arquitectónico, pueden contribuir a la buena estética de las viviendas y al de la ciudad.

6.10. Económicos

Se podría incluir en esta categoría el aporte en el desempeño térmico del edificio y el aumento de la vida útil de las techumbres, pero además los edificios que hoy se certifican como sustentables tienden a tener un precio en el mercado mayor a los que no lo hacen (Wilson, 2005 – citado en *greenroof.org* [26]), y en el caso de edificios corporativos, oficinas u otros similares, otorgan una imagen de compromiso con el medio ambiente y ubicándolas mejor en los ranking actuales.

¹⁰ Aislapol actualmente comercializa un sistema de drenaje y retención de agua fabricado en poliestireno expandido, que en conjunto con el sustrato usado y la capa vegetal aportan la Resistencia térmica mínima especificada por la norma NCh 853.

Las cubiertas vegetales también suman puntos para la certificación LEED® (Leadership in Energy & Environmental Design), dependiendo del sistema de riego que se utilice, el aporte al manejo de aguas lluvia y su contribución al ahorro energético producto de mejoras en la aislación térmica, entre otros.

6.11. Mejora de la calidad del aire interior

En el caso de las fachadas vegetales, se ha demostrado (Susan Loh, 2008 [14]) que funcionan como un filtro del material particulado que se encuentra en suspensión, mejorando la calidad del aire al interior del edificio.

6.12. Otros

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 (Getter & Rowe, 2006 [10]). Además, también pueden ser usados como huertos urbanos para el cultivo de especies comestibles y también florales.

Existen registros en que techos y muros verdes han sido usados como estructuras retardantes de fuego (Köhler, 2003 citado en Oberndorfer et al. 2007 [16])

Los efectos de las ondas electromagnéticas en la salud de las personas son un tema aún en debate. Los techos verdes son capaces de reducir la penetración de esta radiación en un 99% (Herman, 2003 – citado en *greenroofs.org* [26]), por lo que de comprobarse los efectos nocivos que puedan tener, son una buena opción para evitar su ingreso masivo al interior de las viviendas.

CAPÍTULO 7: CONSTRUCCIÓN

En este capítulo se entregan información sobre las distintas capas típicamente usadas en una cubierta vegetal y consejos para su construcción.

7.1. COMPONENTES DE LA CUBIERTA VEGETAL

7.1.1. Impermeabilización

Esta capa es la encargada de mantener la losa de techumbre seca asegurando que la humedad no ingrese.

Las cubiertas vegetales prolongan la vida útil de la impermeabilización, ya que la protegen de la intemperie, especialmente del sol y de otras acciones posiblemente destructivas como el tránsito de personas.

Materiales

- Membrana de EPDM (Etileno propileno dieno, Tipo M ASTM)

Tienen una prolongada vida útil, ya que son de caucho sintético de gran elasticidad, por lo que es resistente a cambios de temperatura y dilatación de los materiales. Brinda una solución integral y de fácil instalación, pues incluye los componentes necesarios como bandas perimetrales, uniones en las esquinas y retornos.

- Membrana de TPO (Poliolefina termoplástica combinada con caucho de propileno y etil-propileno)

Se arma con una malla de poliéster y es resistente a las condiciones meteorológicas propias del caucho. Tiene capacidad de soldadura por calor como un termoplástico, por lo que lo convierten en un sistema de fácil ejecución y amigable con el medio ambiente.

- Membrana líquida de poliuretano

Se coloca mediante una aplicación líquida y en frío mediante rodillos o escurridores de goma dentados, creando una membrana única, sin traslapes ni uniones. Es posible medir los espesores con calibradores dentados cuando la membrana aún está líquida. Es de fácil instalación en diferentes situaciones y lugares de difícil acceso. Una vez curados quedan como una goma sin costuras, totalmente

adheridos a la superficie inferior. Se recomienda usar un espesor mínimo de 3 [mm] (3 litros por metro cuadrado).

- Lámina de PVC (policloruro de vinilo)

Las membranas de PVC son muy flexibles y resistentes a la condiciones de la intemperie. Además del policloruro de vinilo, contienen plastificantes no migratorios que garantizan una alta impermeabilidad y una completa ausencia de poros. Se recomienda usar un espesor entre 0.5 y 3.0 [mm].

La desventaja de las membranas de láminas de PVC radica en que en su proceso de fabricación se utiliza una gran cantidad de cloro, por lo tanto dentro de la industria podrían no ser consideradas como un material “verde” por lo contaminante producto de su elaboración.

7.1.2. Protección anti-raíz

Asegura que las raíces de las plantas no traspasen la impermeabilización y se puedan generar problemas de ingreso de humedad a las viviendas.

Es importante mencionar que para cubiertas intensivas se debe evaluar la colocación de doble protección anti-raíz, debido a la gran fuerza destructora de las raíces de las plantas que pueden dañar no solo la impermeabilización, sino también otras capas como el soporte estructural.

Materiales

Suelen usarse materiales plásticos o polímeros artificiales, actuando comúnmente como barrera mecánica y en algunos casos como barrera química. Comúnmente se utiliza Polietileno de alta densidad (HDPE: High Density Poli Ethilene).

El PVC también puede ser una buena alternativa ya que es económico, durable y resistente, pero como se mencionaba, actualmente es cuestionado debido a la contaminación que genera por la alta cantidad de cloro y aditivos que son usados durante su proceso de fabricación.

7.1.3. Drenaje

Esta capa está compuesta por tableros de desagües y/o tubos que remueven suficiente agua de la cubierta para así no comprometer el sistema de impermeabilización o la estructura soportante. Promueven la no saturación del sustrato, pero permite que suficiente agua permanezca en el sistema para sustentar la vida de

las plantas. Pueden actuar también como una barrera de protección o parcial barrera anti-raíces.

Dependiendo de la naturaleza del proyecto, los sistemas pueden ser simples o complejos. Cuando se tienen techos con pendiente, la gravedad ayuda al drenaje y usando canaletas y sistemas básicos de canales será suficiente. Por el otro lado, los techos planos necesitan más elementos que deben ser coordinados con otros sistemas del edificio para extraer el exceso de agua y evitar su acumulación. Por esto, se recomienda usar una pendiente mínima del 1%, que ayuda al escurrimiento y facilita el drenaje.

Muchos tableros de drenaje que se encuentran actualmente en el mercado se asimilan a la forma de una caja de huevos los cuales retienen agua para minimizar la pérdida y así reducir la necesidad de un permanente riego.

Es importante usar materiales que no se degrade y pierdan su capacidad de drenaje u obstruyan el sistema, y que por supuesto, no colapsen al momento de la instalación de las capas superiores.

Materiales

- Esterillas porosas hechas de plástico, poliestireno o incluso de coco natural.
- Algún medio granular como gravilla
- Tablero rígido de drenaje (usado generalmente en sistemas de instalación modulares)
- Drenaje típico de techumbres con pendiente
- Canaletas
- Tuberías de drenaje
- Tableros con retención de humedad

7.1.4. Filtro

Hecho de un material liviano a prueba de putrefacción puesto por encima o incluido en la capa de drenaje para mantener el medio de crecimiento en su lugar y así mismo prevenir que las partículas finas bloqueen el sistema de drenaje. Al igual que el drenaje, puede cumplir la función de barrera de raíz adicional.

Es recomendable usar filtros múltiples dependiendo de la cantidad de sustrato, siendo lo más típico ubicar uno sobre la capa de drenaje y otro bajo ella.

Materiales

- Material paisajístico no tejido y no biodegradable

- Alfombras de fibras de poliéster livianas y resistentes al agua
- Alfombras de polietileno-polipropileno

7.1.5. Sustrato

Dentro de los componentes del perfil de un techo verde, el sustrato y la capa vegetal, son las capas que más cuidado y estudio previo requieren, debido a la amplia gama de posibilidades y combinaciones que existen. Quedan generalmente condicionadas al proyecto paisajístico y varían según el criterio de diseño, por ejemplo si se quiere minimizar el peso del techo, se escogerá un sustrato de combinación liviana y de espesor pequeño. Por el contrario, si se desea optar por maximizar el número y tipo de plantas de la cubierta ajardinada, se elegirá entonces una combinación propicia para generar un buen medio de crecimiento a las plantas y el espesor del sustrato tendrá que ser mayor.

En la literatura se pueden encontrar muchas 'recetas' para hacer una mezcla óptima de sustrato, pero, como esta elección depende tanto del proyecto en particular que se está analizando, debe realizarse un estudio especial para cada caso y definir los mejores componentes que lo integren.

El porcentaje de material orgánico suele limitarse a no más de un 20% (Otros autores lo limitan a 10%), debido a que un exceso de este componente conduce a problemas con el drenaje, una reducción en el volumen total del sustrato, genera aparición de malezas y un crecimiento excesivo de pastos y plantas. Por todo esto, la cubierta verde podría requerir mayores niveles de mantención y reabastecimientos más frecuentes, lo que implica mayores costos a futuro. De todas formas, debe considerarse que en climas húmedos los compuestos orgánicos se descompondrán más rápidos que en climas áridos, por lo que el porcentaje deberá ser menor en los primeros.

Mezclando material orgánico e inorgánico según las condiciones de cada proyecto, se proporcionará un medio de crecimiento adecuado que genera un buen amarre de las raíces, permitiendo a la vez retención y drenaje de agua, preservando las condiciones necesarias para la vida de las plantas.

Materiales

- Material orgánico

Suele utilizarse paja orgánica, madera, césped, hojas, pasto cortado, residuos de agricultura, turba, abono, tierra de hojas o materiales similares. Debido a que la turba es un material orgánico de compost 100% vegetal, su descomposición es más lenta, por lo que asegura presencia de nutrientes por más tiempo que el compost tradicional.

- Material inorgánico

Los componentes agregados o el material inorgánico son los encargados de mantener la vida de las plantas y proveer a la superficie porosa de aire, agua e intercambio de gases. Debe cumplir funciones de mantención como amortiguar y resistir los cambios de los niveles de pH y bioremediar los contaminantes cuando se requiera.

Se utiliza generalmente vermiculita expandida, gránulos de arcilla liviana expandida, roca volcánica, piedra pómez, arena, zeolita, perlita expandida, arena gruesa, tejas y ladrillo trozado o molido, diatomita, gravilla, lana de roca, entre otros.

7.1.6. Capa vegetal

Es la capa donde se desarrolla la vida vegetal. La elección de plantas depende principalmente del clima al que son expuestas, pues las afectan los cambios de temperatura, las precipitaciones, el viento y la altura de la cubierta vegetal.

Tabla 42: Vegetación recomendada según espesor del sustrato.

Espesor [cm]	Inaccesible / Invisible	Inaccesible / visible desde distancia lejana	Inaccesible / visible desde distancia cercana	Accesible
0 - 5	Comunidades simples de sedum y musgo.	Comunidades simples de sedum y musgo.	Comunidades simples de sedum y musgo.	Comunidades simples de sedum y musgo.
5 - 10		Gramíneas, vegetación alpina, y bulbos pequeños que resisten la sequía.	Gramíneas, vegetación alpina, y bulbos pequeños que resisten la sequía.	Gramíneas, vegetación alpina, y bulbos pequeños que resisten la sequía.
10 - 20			Mezcla semi extensiva de gramíneas y árboles de tamaño bajo que resisten la sequía / Arbustos pequeños y césped.	Mezcla semi extensiva de gramíneas y árboles de tamaño bajo que resisten la sequía / Arbustos pequeños y césped.
20 - 50				Pequeños arbustos, plantas comestibles, plantas perennes y césped.
> 50				Pequeños árboles de hoja caduca y conífera.

(Corporación del Desarrollo Tecnológico – CDT [3])

Hay que señalar que las recomendaciones de la tabla 42 son muy amplias, y cabe la posibilidad de que no se puedan aplicar cuando el techo verde es muy alto y está expuesto a mucho viento, si es que no se ha construido la protección adecuada que lo impida. Además, algunos sustratos muy livianos no proporcionan la capacidad de amarre suficiente cuando las raíces de las plantas son muy fuertes, por lo que se debe tener cuidado cuando se minimice el peso de una mezcla.

Para la elección de las plantas, se debe tener en cuenta:

- Clima de la región
- Espesor del sustrato y su efectividad en el almacenaje de agua
- Inclinación del techo, pues mientras más empinado, mayor debe ser su capacidad de almacenaje de agua
- Exposición al viento, pues hace que aumente la evapotranspiración y con ello la necesidad de riego
- Orientación geográfica
- Sombra
- Cuantía de precipitaciones
- Resistencia a la sequía de las plantas
- Resistencia a las heladas
- Altura de crecimiento
- Puntos de floración
- Formación densa del colchón con fuerte desarrollo en altura y crecimiento disminuido a lo ancho
- Plantas dominantes por sobre otras

Si bien las comunidades de *sedum* no son autóctonas, mundialmente han demostrado un comportamiento superior a muchas otras comunidades de plantas principalmente por su capacidad de resistir sequías y condiciones de clima adverso, como heladas en invierno.

Existen diversas opciones para vegetar un techo verde:

- Semillas: El sembrado por semillas permite una distribución pareja de plantas sobre todo cuando se mezclan en conjunto con el sustrato. Se recomienda usar 2 [gr/m²] cuando el sembrado es húmedo y 4 a 8 [gr/m²] cuando el sembrado es seco.
- Gajos: Los tipos de *sedum* suelen cultivarse con trozos cortados de otras plantas. Prenden fácilmente y se recomienda utilizar aproximadamente 40 retoños (trozos) por cada metro cuadrado de techo (equivalente a 30-50 [g/m²]).
- Rollos de césped: Los rollos de césped prefabricados pueden ser una opción. Sin embargo necesitan un mantenimiento igual al del césped de un jardín convencional y agregan aproximadamente 2 [cm] al espesor del sustrato.

- Mantas de vegetación: Algunas empresas arman mantas de vegetación en fieltros, redes o mallas de hilo trenzado. Contienen diferentes tipos de plantas según los requerimientos particulares y agregan aproximadamente de 1 a 3.5 [cm] extras al espesor al sustrato.
- Planta viva: Plantación directa de las especies escogidas para el techo.

Para espesores de sustrato entre 3 y 5 [cm], entre 5 y 10 [cm] y entre 10 y 18 [cm] se recomienda¹¹:

Tabla 43: Plantas recomendadas para espesores de sustrato entre 3 a 5 [cm].

Plantas para sustratos de 3 a 5 [cm]
Ceratodon purpurelis
Campothecium sericeum
Syntherichia ruralis
Schistidium apocarpum
Barbula convoluta
Brachythecium rutabuum
Bryum argenteum
Hypnum cypressi forme

(Gernot Minke [15])

Las plantas *Sedum* y *Sempervivum* pertenecen a las suculentas, que tienen la capacidad de almacenar agua en los brotes y en las hojas, y pueden reducir su evapotranspiración según el agua que disponen son las que mejor se adaptan a lugares soleados.

¹¹ Espesores considerados para techos planos. Si la inclinación es de 15° a 30° se debería agregar aproximadamente 1 a 3 [cm] más de sustrato.

Tabla 44: Plantas recomendadas para espesores de sustrato entre 5 a 10 [cm].

Plantas para sustratos de 5 a 10 [cm]	
Suculentas	Liliáceas
Sedum acre	Allium atropurpureum
Sedum álbum	Allium flavum var. Minus
Sedum anacampseros	Allium montanum
Sedum cauticola	Allium oreophilum
Sedum cyaneum	Allium schoenoprasum
Sedum ewersii	
Sedum floriferum	Gramineas
Sedum hispanicum	Bromus tectorum
Sedum hybridum	Carex humilis
Sedum kamschaticum	Cares ornithopoda
Sedum krajinae	Festuca punctoria
Sedum lydium	
Sedum refelexum	
Sedum selskianum	
Sedum spurium	
Sempervivella sedoides	
Sempervivum arachnoideum	
Sempervivum montanum	
Sempervivum tectorum	

(Gernot Minke [15])

Tabla 45: Plantas recomendadas para espesores de sustrato entre 10 a 18 [cm].

Plantas para sustratos de 10 a 18 [cm]
Festuca rubra genuina
Festuca rubra commutata
Festuca ovina
Festuca glauca
Festuca scorparina
Poa pratensis
Poa pratensis angustifolia
Agrostis tenuis (poca cantidad)
Carex digitata
Bromus erectus
Carex flacca (poca cantidad)
Carex humilis
Stipa pennata
Stipa ucrainica

(Gernot Minke [15])

Las plantas anteriormente nombradas son solo una recomendación y no representan las que son estrictamente necesarias. Pero son las que han demostrado alrededor del mundo un mejor comportamiento para las condiciones a las que está sometida una techumbre.

Se debe destacar el trabajo realizado por María Fernanda Gómez Mir, quién realizó una investigación sobre “Adaptación de Distintas Asociaciones de Especies Nativas a Condiciones de Cubiertas Vegetales en la Zona Mediterránea Semiárida de Chile” [6], mostrando las especies que presentaron una mejor adaptación (Tabla 46).

Tabla 46: Especies Chilenas con mejor adaptación visual en techos verdes.

Eryngium paniculatum
Nassella laevissima
Libertia chilensis
Glandularia berterii
Cotula scariosa

(Fuente: María Fernanda Gómez [6]).

Los componentes anteriores son las capas mínimas que un techo vegetal debe tener. Sin embargo, es posible encontrar recomendaciones para techos con inclinación sobre el 5%, donde se permite no instalar una capa de drenaje (producto de la pendiente el agua excedente escurre sola). Con esto, la techumbre resulta más barata. En todo caso, suele agregarse material poroso para que el efecto de drenaje sea aún más efectivo, además de minerales no orgánicos como la vermiculita que permite la retención de agua en el sustrato mismo.

7.1.7. Componentes adicionales

Protección de la impermeabilización

Usado para proteger la membrana impermeable durante la construcción de otros elementos en la obra producto de tráfico de materiales u otros elementos corrosivos como aceites y residuos. Como materiales suelen usarse:

- Geotextil resistente al punzonamiento y tracción mecánica
- Termoplástico sintético/membranas termoestables
- Colchonetas de espuma termoplástico reciclado
- Alfombra de caucho de compuestos reciclados
- Compuestos de fibra de cementos
- Red compuesta de polietileno
- Capa de drenaje (puede actuar como protectora)

Aislación térmica

Es el componente que se instala generalmente en el caso de techos verdes entre la estructura soportante y la impermeabilización con el fin de reducir aún más la transferencia de temperatura. Generalmente se usan:

- Poliestireno expandido o extruido de alta densidad
- Polyisocianurato

Acumulador de agua

Aumenta la capacidad de retención de agua de la capa de drenaje del sistema y con ello el desempeño del sistema de riego, captando también agua de lluvia y reponiendo la humedad en el sustrato por evaporación. Se utiliza generalmente:

- Láminas de plástico con depresiones en forma de copa (“caja de huevos”)
- Packs de hidrogel
- Colchonetas de espuma de uretano
- Absorbente Polar

Protección de erosión

Protege el medio de crecimiento cuando queda sin sembrar durante largos períodos y durante el establecimiento de las raíces de las plantas, que posteriormente lo mantienen en su lugar. Los techos inclinados pueden requerir una capa de protección contra la erosión permanente si están expuesto a fuertes vientos durante el crecimiento de las plantas.

Materiales típicamente usados:

- Tela no tejida de protección / colchonetas
- Láminas de protección
- Mantillo
- Mantas fotodegradables

Sistema de riego

Permite el control de la cantidad de agua suministrada al techo verde. Facilitan la mantención y aseguran la supervivencia a largo plazo. Pueden ser temporales, pues muchas de las plantas típicamente usadas en una cubierta extensiva después de uno o dos años de asentamiento, pueden vivir sin agua adicional a la proporcionada por el clima del lugar.

Sistemas de riego:

- Elevados
- Rociadores
- Goteo (Superficial o cerca de la superficie)
- Capilaridad
- Base goteo
- Manguera

Retenedores perimetrales

Separan las áreas con vegetación de los componentes estructurales de cubierta como antepechos, drenajes, tragaluces, senderos, pasarelas, etc. Pueden proteger la capa vegetal del viento en las esquinas y bordes de los techos.

Productos generalmente usados:

- Retenedores de hormigón prefabricados
- Bordes de aluminio
- Borde de madera
- Maceteros
- Retenedores de productos reciclados

Caja registrable

Marcos con forma de caja sin fondo y con tapa, que permiten la inspección de los puntos de desagüe y mantenerlos limpios. Son de acero inoxidable o aluminio.

7.2. CONSTRUCCIÓN DE FACHADAS

Respecto a la construcción de fachadas vegetales, los tipos pueden variar mucho (Figura 4), yendo desde un sistema tipo panel que requiere una estructura soportante auxiliar costosa y alto mantenimiento (Hotel Intercontinental, figura 51), a un sistema tipo enrejado o 'maceta' que básicamente son enredaderas escalando por una estructura auxiliar simple, pues no soporta un gran peso. Dependiendo del presupuesto y los requerimientos del mandante se escogerá el mejor sistema, pero como se podrá ver en el capítulo 8, el costo de los sistemas por paneles es bastante alto en cuanto a construcción.

Actualmente no existe ningún documento técnico de instalación de fachadas vegetales. Si bien, se pueden distinguir los tres sistemas vistos en el capítulo 2, el tipo de estructura, panel o fieltro usado, cambia mucho de una empresa a otra. Algunas utilizan bolsillos de fieltro con sustrato al interior para que las plantas crezcan en forma

vertical y evitar ir contra el gravitropismo propio de ellas, permitiendo un crecimiento vertical al igual que las condiciones naturales. Otras utilizan un sustrato liviano mezclado con perlitas de polietileno que gracias a una malla de sustento evita que la mezcla se erosione y caiga. Y otras utilizan el musgo de Huapache (Sphagnum), que es un buen retenedor de agua, como único 'sustrato' para el panel vegetado del muro.

Por la facilidad de instalación y mantención de los sistemas tipo enredadera, su construcción no resulta complicada, pues solo requerirán de una estructura que soporte la maceta, que puede ser diseñada y construida imitando en su esencia, el perfil de un techo verde con el fin de evitar los efectos dañinos de las raíces y la presencia de humedad en los elementos estructurales. Un ejemplo emblemático de esto es el conocido edificio Consorcio, ubicado en la comuna de Las Condes, Santiago.

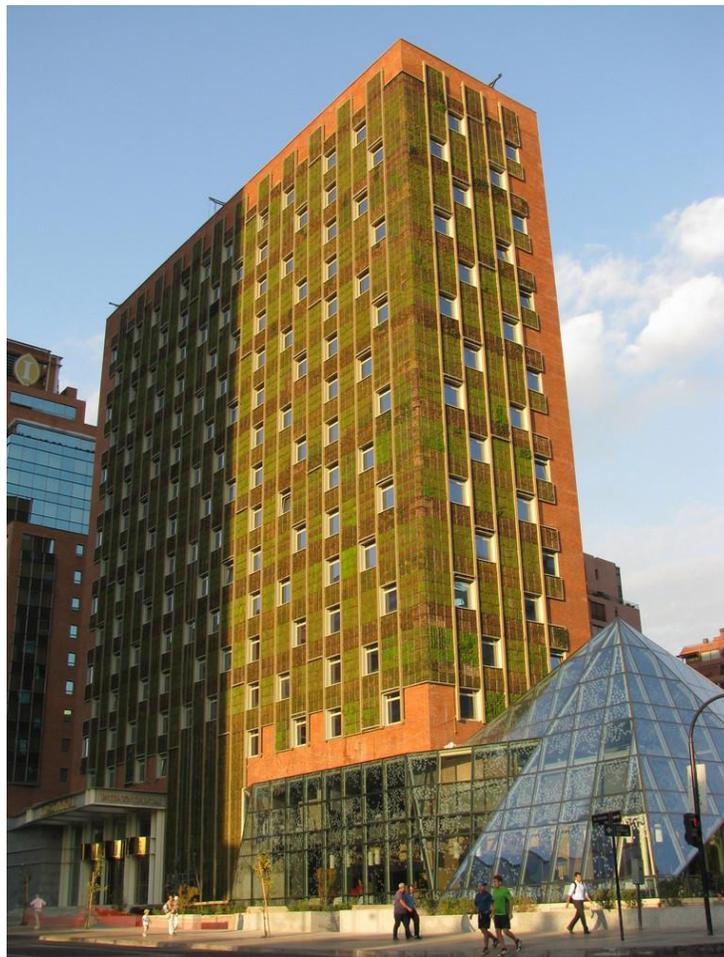


Figura 51: Hotel Intercontinental. Vitacura, Santiago. Fachada verde - paneles.

En la figura 52 se puede observar que la 'jardinera' y el parrón vertical son los únicos elementos adicionales que se agregan a la estructura. El primero, debe ser

calculado para soportar el peso del parrón, el sustrato saturado y lo que pueda llegar a pesar la/s planta/s escogida/s. Al igual que un techo verde, esta maceta debe estar impermeabilizada, pero se podrá excluir del perfil la capa de retención y drenaje si el riego es tan frecuente como la planta solicite para vivir, pues al contrario de los sistemas por paneles o fieltro, no requieren de un sistema de riego complejo e incluso podrían ser accesibles por los usuarios del interior del edificio para su mantención y riego.

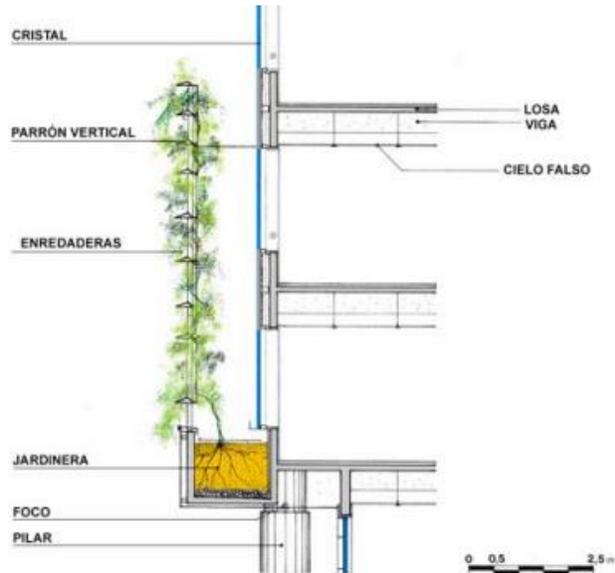


Figura 52: Fachada ajardinada del edificio Consorcio (Enrique Browne [2]).



Figura 53: Interior del edificio Consorcio en verano (Enrique Browne [2]).

Como las plantas usadas son de hoja caduca, en verano representan una protección al sol actuando como una persiana exterior (Figura 53), impidiendo la radiación directa hacia el interior. En invierno al perder su follaje las ganancias por soleamiento serían mayores, evitando el uso excesivo de calefacción y destacando que la incomodidad que pudiese ser producida por la radiación solar directa, se disminuye sencillamente con cortinas o persianas interiores.

CAPÍTULO 8: COSTOS ECONÓMICOS

Al realizar un balance económico de las cubiertas vegetales, además de estimar los gastos en construcción e instalación, también es necesario considerar la gran cantidad de beneficios (capítulo 6) que trae usar esta tecnología, siendo lo ideal realizar un análisis del ciclo de vida de un techo y fachada verde, estimando en términos monetarios el valor de todas sus externalidades.

Traducir a dinero mejoras en la calidad del aire, aumento de las áreas verdes en las ciudades, disminución de las temperaturas por aminoración del efecto isla de calor, mejoras en el manejo de las aguas lluvias, por nombrar solo alguno de los efectos de los techos y fachadas ajardinadas, es una tarea ardua, debido a la inherente complejidad de construir un equivalente económico de estas externalidades, pues además, afectan mucho más allá de la vivienda en particular donde se escoge usarlas.

Se deben tomar en cuenta los gastos en el consumo de agua por riego, la mantención de la capa vegetal y también del sustrato, lo que permite que se desarrolle en óptimas condiciones la vida de las plantas. Principalmente es por estos factores que en este trabajo se escogió ver el efecto de cubiertas consideradas como extensivas, pues así se asegura minimizar el riego y la mantención, y con ello los costos asociados.

Si bien en un principio se pensaba realizar un balance económico que incluyera al menos los gastos en materiales y mantención de las cubiertas vegetales, debido al difícil acceso a información privada de empresas del sector, se limita esta sección a mostrar los costos materiales (Tabla 42), dejando enumerado y recalcando las dificultades y consideraciones que se deben tener para estimar el resto de los costos.

8.1. TECHOS

Tabla 47: Costo aproximado de las capas de un techo verde.

Capa	Precio de la capa [\$/m ²]	
Impermeabilización	\$ 8.000	- \$ 12.000
Barrera anti raíces	\$ 4.000	- \$ 6.000
Manta retenedora de humedad	\$ 8.000	- \$ 8.000
Drenaje	\$ 10.000	- \$ 15.000
Sustrato	\$ 50.000	- \$ 70.000
Vegetación	\$ 5.000	- \$ 15.000
TOTAL	\$ 85.000	- \$ 126.000

Datos proporcionados por TECPRO. Valores correspondientes a julio de 2014.

Debido a que el mercado actual de los techos y fachadas vegetales está recién comenzando a desarrollarse en Chile, los valores de la mano de obra calificada puede ser algo cara, producto de la poca cantidad de empresas calificadas en el sector y

porque aún no es conocido por el general de las personas, lo que suele generar desconfianza.

Los proyectos pueden ser muy variados y distintos entre sí. El solo hecho de considerar si la cubierta será extensiva o intensiva, abarata o encarece los costos, respectivamente. Es por ello que estimar el costo de una cubierta verde es muy variable y complejo, influyendo aspectos como:

- Ubicación del proyecto
- Situación de pedidos de la empresa encargada y del proveedor
- Número de quiebre en el techo
- Altura del techo
- Inclinación del techo
- Número de salidas de ductos de ventilación o irregularidades en el techo
- Forma de terminación de bordes
- Diseño paisajístico

Cuando se tiene una configuración de un techo simple, los costos de una cubierta extensiva económica pueden asemejarse a los de los techos convencionales [15]. Por la gran cantidad de beneficios que tiene instalar cubiertas vegetales, los techos verdes serían una mejor opción que las tradicionales.

Según los resultados del capítulo 5, anualmente se tendría un ahorro en costos de energía de \$28.323 en la casa y \$121.200 en el edificio, lo que es aproximadamente un 20.9% y un 5.5% menos gastos en electricidad por climatización de la vivienda.

8.2. FACHADAS

Si los techos verdes son vistos como una tecnología bastante nueva en el mercado nacional de la construcción, las fachadas vegetales son más escasas y consideradas aún más innovadoras. Es por esto, que resulta difícil encontrar información sobre costos, mantención y cualquier tipo de recomendación en general. Incluso de bibliografía, estudios e investigaciones que existen, los datos son exiguos, dificultando aún más estimar los efectos que puedan tener en la aislación térmica, sus otras ventajas y los costos en los que se incurre al instalar estos sistemas.

Como se ha visto en el capítulo 2, existen diversos sistemas de fachadas vegetales, donde el tipo panel es el más costoso y el sistema tipo enrejado el más económico, pues no significa una instalación compleja y de gran mantenimiento. En base a esto, y por contactos personales con gente del sector, hay muchos que no defienden la idea de muros verdes tipo panel y tipo fieltro para grande áreas, debido al gran costo que tienen y al posterior continuo y difícil mantenimiento. Además, como la

capa de retención muchas veces no existe, la necesidad de agua y riego permanente se hace mucho mayor, por lo que resta bastante a la ‘sustentabilidad’ de esta solución.

En la tabla 43 se puede ver un orden de magnitud de cuánto costaría en materiales instalar un muro verde tipo panel.

Tabla 48: Valor estimado de fachada vegetal

Fuente	Valor	Valor [\$/m²]
Punto Vertical	18 UF / m ²	\$ 433.116
Bruce Dvorak	30 USD/sqf	\$ 182.448

Valores entregados en el I seminario de infraestructura vegetal [24], mayo 2014.

Se puede observar la gran diferencia entre el costo de un metro cuadrado de fachada vegetal en Chile, versus el entregado por Bruce Dvorak (EEUU), lo que se puede explicar por un mercado mucho más desarrollado en Norteamérica.

Aunque el costo del metro cuadrado de un muro verde es bastante alto, hay que destacar que se trata del sistema por paneles, el cual representa la opción más cara entre los tres sistemas mencionados en el capítulo 2, debido a que se trata de la instalación más compleja y que requiere de una verificación estructural adicional.

Por todo lo anterior, debido a que implicarían un gasto monetario marginal comparado con el costo total de un proyecto de casa o edificio, instalar fachadas tipo enrejado, que funcionan como una “segunda piel vegetal” resulta una opción económica y ambientalmente eficiente, pues tienen muchos de los beneficios que se han enumerado en el capítulo correspondiente y no requieren de una mantención extrema como el caso de los otros dos tipos de sistemas.

Del informe [2] realizado el año 2007 a 14 años de la construcción del edificio Consorcio, donde se comparó el desempeño energético de 10 edificios corporativos similares construidos en Santiago con los registros del edificio Consorcio, los resultados (Figuras 54 y 55) muestran una disminución en el consumo energético de un 35.34%, siendo el de un piso tipo sin “doble piel vegetada” de 136.10 [kWH/m²] y 88.00 [kWH/m²] para uno protegido vegetalmente, lo que luego se traduce en un costo monetario 25% menor, estimando un 20% de ahorro anual en gastos de energía.

Es por estos motivos que el edificio de Consorcio ha sido escogido como “Mejor edificio de la década del 90’ en Chile” el año 2004, el “Mejor edificio de los últimos 30 años”, “Uno de los mejores 3 edificios de Santiago el 2003 y como uno de “Los 6 mejores edificios de Santiago de todos los tiempos” el 2006. Lo que claramente se ve respaldado tanto en su estética arquitectónica como en su aporte medioambiental y desempeño energético.

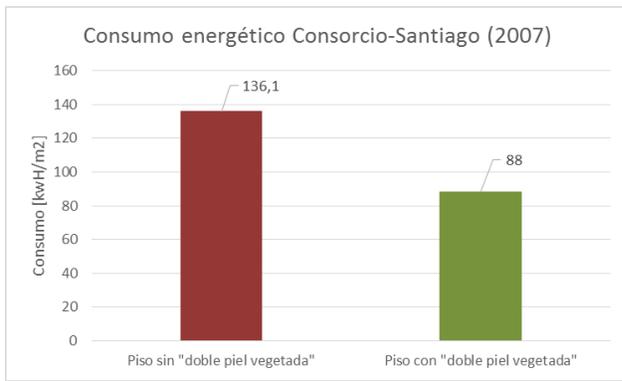


Figura 54: Consumo energético – Consorcio (2007) [2].

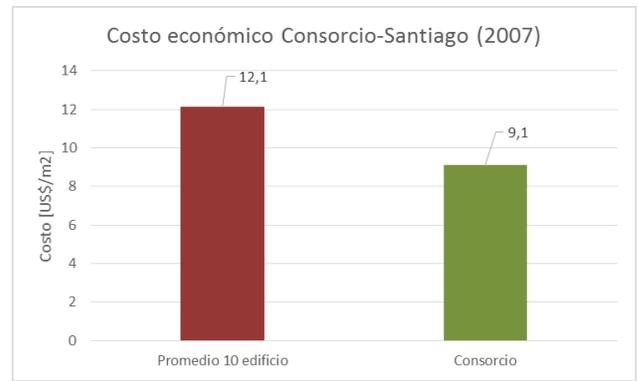


Figura 55: Costo económico – Consorcio (2007) [2].

CAPÍTULO 9: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

9.1. DISCUSIÓN

9.1.1. Discusión respecto a los ensayos de conductividad térmica

De los ensayos realizados en el laboratorio del IDIEM, es posible obtener la conductividad térmica en estado seco de los sustratos que fueron medidos, y con ello su aporte a lo exigido por la OGUC sobre los requerimientos mínimos de resistencia térmica de la envolvente. Posteriormente, al comparar estos valores con los resultados de la modelación, se ve que el aporte del techo es mayor que al considerar únicamente los aportes del sustrato, lo que es producto de todos los efectos que el modelo computacional considera en la simulación y que no son posibles de agregar en un cálculo simple de la resistencia térmica del perfil.

Debido a los efectos de migración de humedad cuando las caras de cada probeta están sometidas a distintas temperaturas y a lo difícil de manejarlas en estado saturado y controlar el contenido de agua en las mezclas, se desechó la posibilidad de realizar ensayos a probetas del sustrato con distintas humedades.

Los resultados obtenidos en el laboratorio son congruentes con lo que se ha visto en otras investigaciones, y con lo que se pudo observar en el I seminario de infraestructura vegetada [24]. Sin embargo, pese a que la extrapolación realizada en este trabajo para obtener la curva de conductividad térmica versus contenido de humedad puede validarse con los estudios mencionados, es necesario medir de forma real el efecto que la humedad produce en las propiedades térmicas del sustrato, pues como se ha dicho, este nunca estará seco y en muy raras ocasiones saturado en un 100%, pensando en la zona climática de Santiago de Chile.

En la figura 20 se puede ver que el aporte a la resistencia térmica de la mezcla de sustrato con espesor de 10 [cm], se encuentra entre un 20% y 7% cuando está seco y saturado de agua, respectivamente. De la modelación se observa que la carga energética en verano disminuye en aproximadamente un 21%, siendo siempre un aporte mayor que el caso más favorable estimado sin el programa computacional.

9.1.2. Discusión respecto al sustrato

Es importante destacar que dentro de la revisión bibliográfica realizada no hay investigaciones que concluyan la existencia de una mezcla óptima en cuanto a aislación, pues buscar o enfocarse en una sola variable implica dejar de lado otras. Es posible encontrar un sustrato que aisle más que otros, pero no es lo fundamental, pues esta misma mezcla puede no generar las condiciones necesarias para un buen desarrollo de la vida de las plantas y quizás un sustrato menos aislante finalmente produce una capa vegetal que termina protegiendo más al edificio, por ende, generando un desempeño energético más eficiente.

La capa vegetal tiene un gran efecto en las propiedades térmicas de la envolvente, pues evita el soleamiento directo generando sombra, disminuyendo la temperatura del aire circundante a través de la evapotranspiración, y de por sí actúa como un aislante natural. Estos son los efectos que *DesignBuilder* permite considerar y que no son de fácil inclusión en los cálculos de la resistencia térmica del techo verde. Pero como es el sustrato el que entrega los nutrientes y el medio para que finalmente pueda existir la vegetación, un sustrato malo generará una capa vegetal pobre y efectos en la aislación térmica considerablemente menores.

9.1.3. Discusión respecto a la modelación

De la figura 31 se pueden ver las variables que afectan directamente a la capa vegetal y que condicionan sus efectos como aislante (además de otras propiedades térmicas del sustrato). En este trabajo, se usaron los valores por defecto que entrega el programa, para así tratar de obtener resultados 'promedio' y con ello una idea de lo que podría llegar a aportar en términos de ahorro de energía el usar techos vegetales. Claramente, debido al gran número de variables que aquí intervienen, podría realizarse un estudio aparte de la sensibilidad de cada una de ellas. Por ejemplo, el LAI (leaf area index) es uno de los parámetros más importantes, porque representa la cantidad de sombra que producen las hojas de las plantas, lo que en definitiva evita el soleamiento directo, que genera gran parte de las ganancias térmicas en verano. Esta, al igual que el resto de las variables, se usó con el valor recomendado por *DesignBuilder*, pero en teoría podría presentar amplias mejoras en aislación si se usan plantas que tengan un LAI mayor, es decir, vegetación más tupida.

Variar los parámetros de modelación como ocupación, ventilación artificial, tipo de iluminación, etc. no es útil para ver el efecto aislado de cambiar la techumbre tradicional por un techo verde (*ceteris paribus*), y fue por este motivo que no se realizaron ajustes en estos valores. Al no saber los efectos que estos tienen con o sin cubierta vegetal, podría ocurrir por ejemplo, que la ventilación artificial e incluso la natural se viera favorecida por la presencia de las plantas en techos y/o muros, por lo que estudiar estos fenómenos también entra en una línea de investigación futura.

Por lo anterior, desarrollar estudios sobre cómo varía el ahorro energético de las cubiertas verdes, modificando los parámetros de la figura 31, que considera el modelo computacional para simular el techo verde, sería una investigación de mucho interés, y por sobre todo, si los resultados se pudiesen comparar con mediciones experimentales o con un techo o fachada vegetal ya existente.

Los resultados obtenidos fueron positivos para ambos modelos, pues muestran una disminución de la carga energética de climatización durante el año, para las dos condiciones en las que el programa permite modelar; invierno y verano. Se debe destacar que la resistencia térmica del perfil del techo tradicional y del techo verde, calculado para el modelo según la fórmula (1), entrega valores prácticamente iguales, 2.692 y 2.634 respectivamente. Son los efectos que han sido nombrados al comienzo

del capítulo 5 y que *DesignBuilder* considera al realizar la simulación, los que otorgan el mayor aporte de aislación al techo vegetal.

Para la casa, en el diseño de la condición de invierno, la disminución anual de carga para calefaccionar llega casi a un 5.90%, siendo en verano considerablemente mayor, alcanzando una disminución anual de un 21.46%.

En el caso del edificio, en el diseño de la condición de invierno, las pérdidas por la techumbre bajan aproximadamente un 7.74%, lo que se traduce en una disminución anual de 1.98% de la energía destinada a climatización. En la condición de verano, la carga energética para alcanzar la temperatura de confort, baja en un 3.53% para todo el edificio, siendo el último piso el más beneficiado con una disminución de 27.47%. Cabe destacar que a excepción de los últimos dos niveles, los resultados para el resto de los pisos son prácticamente iguales a los del caso base.

El mayor problema que se presentó al utilizar el programa, fue la incapacidad de realizar la modelación para una fachada vegetal. Como se ha dicho en otros capítulos, esto es evidencia de la falta de investigación y desarrollo en este tema en particular.

Otro problema observado fue producido por el tipo de licencia utilizada en la modelación, ya que al ser una versión para estudiantes, el programa no permitía generar la simulación energética para más de 50 zonas, generando problemas con el diseño original del edificio. Como se comentó en el capítulo 5, por este motivo se decidió simplificar el diseño y representar cada departamento como una única zona y así lograr una simulación que permitiera ver los efectos de un techo verde en el edificio modelado.

9.1.4. Discusión sobre la construcción de las cubiertas

Con la formación entregada por la Universidad y lo que se ha constatado con la revisión bibliográfica realizada y contactos personales con gente del sector, en términos de construcción, los techos verdes no son una cubierta que genere mayores inconvenientes o gastos extras estructuralmente hablando. Pese a lo anterior, se deberá realizar una revisión acabada y probablemente incurrir en mejoras estructurales, en el caso de instalar una cubierta intensiva y transitable. Sin embargo, estas no son tareas complejas y no representan problemas en el diseño estructural, más que un aumento en los costos de los elementos.

Es muy importante que la capa de impermeabilización sea bien instalada asegurando siempre un 100% de impermeabilidad al agua y resistencia a las capas superiores y otros agentes. Existen empresas especializadas que han sido las mismas que han comenzado a explotar el nicho de los techos verdes, por lo que es posible dejar esto en manos expertas.

Como se ha visto, existen varias alternativas de cubiertas vegetales, pudiendo variar la vegetación, el sustrato y en menor medida los materiales típicamente usados en las otras capas. La mejor elección dependerá de las características del proyecto, por lo que se debe señalar que no existe una receta replicable a todos los escenarios, ni para sustratos, plantas u otra capa del perfil. Depende siempre de cada uno de los casos, del criterio de diseño del paisajista, arquitecto, ingeniero o lo que el mandante requiera.

Actualmente, la información que más abunda son recomendaciones sobre la construcción de las cubiertas, existiendo manuales, guías, libros, documentos técnicos, entre otros. Por lo que en este aspecto, los techos verdes, no así las fachadas, disponen de buenas fuentes de información, donde destacan:

- Guía alemana de diseño, construcción y mantenimiento - FLL
- Manual de Techos Verdes de Gernot Minke
- Documento de la CDT “Recomendaciones Técnicas para Proyectos de Cubiertas Vegetales”
- “Green Roof Construction and Maintenance”, Kelly Lockett
- “The Green Roof Manual”, Edmund C. Snodgrass & Linda McIntyre

9.1.5. Discusión sobre los costos económicos

Se ha hecho hincapié en la importancia de realizar un balance económico completo, pues hay muchos beneficios por el uso de las cubiertas vegetales que son difíciles de traducir a términos monetarios. Por lo tanto, al considerar solo el costo de la inversión inicial, no se está usando un parámetro suficiente, ya que en general los costos son iguales o superiores a los de una cubierta típica.

En general, es difícil estimar los costos, pues como se ha reiterado, el diseño y construcción varía mucho según las condiciones de cada proyecto. Dos cubiertas extensivas con las mismas capas y componentes, pueden ser muy distintas económicamente hablando si están ubicadas en regiones diferentes, si los bordes y geometría del techo son especiales, entre otros motivos.

9.1.6. Beneficios sociales y sustentabilidad global

Un aspecto fundamental a considerar dentro de los beneficios del uso de techos y fachadas vegetales mencionados en el capítulo 6, reside en que sus efectos positivos no se restringen únicamente al proyecto mismo, sino que aportan a un entorno global y no solo a la superficie donde fueron instalados.

Cuando se decide utilizar cubiertas vegetales en un proyecto de construcción, aumentan las áreas verdes, mejora la calidad del aire, disminuye el efecto isla de calor, se contribuye a la biodiversidad, se mejora el manejo y retención de las escorrentías de

aguas lluvias, se reduce la contaminación acústica y también mejora la estética de los edificios, y con ello el de la ciudad. Es por este motivo que se está contribuyendo de forma directa con grandes beneficios a la sociedad, generando ciudades más verdes, sostenibles, con una mejor calidad de vida para sus habitantes y además se genera conciencia sustentable en las ciudades y países vecinos, permitiendo abrir las puertas para considerar los beneficios globales que la instalación mundial de techos verdes podría tener, como por ejemplo, en el calentamiento global.

Si las condiciones climáticas de la región no lo permiten, instalar techos intensivos o fachadas tipo panel, que requieren de alta mantención y riego equivalente al de un jardín tradicional, no representaría en esencia los fundamentos de una opción 'sustentable', debido al gasto en agua que se generaría. Dicho recurso actualmente escasea en muchas regiones del mundo, condición que supone es creciente con el paso del tiempo. Por lo mismo, sería recomendable minimizar el riego y mantención, simulando en la cubierta las condiciones propias de la región climática donde está ubicado el proyecto, lo que implica un diseño bastante más natural que usar especies introducidas o forzando jardines que debido a las condiciones del lugar, podrían generar grandes gastos en mantención.

9.2. CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos tanto en el laboratorio como por medio de la modelación computacional, la revisión bibliográfica y el desarrollo de los distintos capítulos de este trabajo, es posible concluir que:

- Por el gran número de variables que están involucradas y la gran cantidad de beneficios que producen los techos y fachadas vegetales, es necesario continuar realizando investigación teórica y práctica, poniendo énfasis en registrar el desempeño de muros y fachadas vegetales existentes y en un análisis de sensibilidad de los parámetros de diseño.
- Pese a que los techos verdes han sido usados desde hace unos 50 años en Alemania y la mayor parte de la bibliografía proviene de Europa y de América del Norte, es necesario hacer investigaciones en cada clima y región particular debido a lo complicado de extrapolar, por ejemplo, un resultado obtenido en un clima del norte de Europa a un clima o región de América del sur.
- Según lo que se pudo observar de los resultados de la modelación computacional, los techos verdes son una buena opción como aislante térmico, destacando especialmente durante el verano.
- Los aportes medioambientales son más relevantes que las mejoras que pueda tener el desempeño térmico de la vivienda, pues los beneficios de las cubiertas vegetales afectan positivamente más allá de los límites del edificio o casa donde se utilicen, pudiendo llegar a tener efectos positivos mundiales al masificar su uso, permitiendo purificar el aire, disminuir la contaminación, disminuir el fenómeno conocido como isla de calor, mejor manejo de las escorrentías de aguas lluvia, mayor calidad de vida, mayor contacto con la naturaleza, entre algunos de los beneficios señalados en el capítulo 6 y que son el argumento fundamental a favor de la utilización de esta tecnología.
- Debido a la diversidad de climas que existen en Chile, la utilización de techos verdes en otras regiones puede resultar más factible y provechosa que en Santiago.
- Con la información disponible sobre el desempeño que ha tenido el edificio Consorcio-Santiago, es posible ver en la práctica que los muros verdes son una opción viable y su uso conlleva a ahorros evidentes en el consumo energético. Sin embargo, es necesario realizar estudios sobre ellos, debido a la escasez de información que se ha observado y a la inexistencia de un modelo que permita simular el comportamiento de las fachadas vegetales, con el fin de estimar sus efectos como aislantes y diseñar conscientemente a futuro.
- La construcción de techos verdes no está actualmente normada, sin embargo existen documentos técnicos, recomendaciones y bibliografía suficiente que permiten su correcta instalación y ejecución en proyectos que los involucren.
- Para realizar un balance económico completo se debe hacer un análisis del ciclo de vida de la cubierta ecológica, estudiar la forma de expresar sus aportes medioambientales en términos monetarios y los ahorros que se producen debido a las mejoras en el comportamiento térmico de los edificios.

9.3. Apreciación general

Como egresado y futuro ingeniero, estoy seguro de que los techos y fachadas vegetales, sumando todos sus aportes al medioambiente, ahorros energéticos, mejoras en la calidad de vida de las personas y su entorno, superan con creces a cualquier otra alternativa que el mercado pueda ofrecer. Es fundamental comenzar a considerar su importancia, sus enormes beneficios y lo que significa construir espacios y ciudades más confortables, saludables y sostenibles para las generaciones futuras.

Así mismo, estimo que representan enormes oportunidades de investigación y beneficios económicos agregados a futuro, que sin duda permitirán constituir a las cubiertas verdes, como una opción cada vez más viable y a ser considerada. El gran desafío es implementar aquellas estrategias y políticas adecuadas, enfocadas a desarrollar consciencia y materializar proyectos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] **Bianchini, F., & Hewage, K. (2012).** How “green” are the green roofs? Lifecycle analysis of green roof materials. *Building and Environment*, 48, 57-65
- [2] **Browne, Enrique (2007).** *El edificio “Consortio-Santiago” 14 años después.* Revisado el 21-06-2014 en http://www.ebrowne.cl/escritos/2007_consortio_stgo_e.pdf.
- [3] **Corporación del Desarrollo Tecnológico.** *Recomendaciones Técnicas para Proyectos de Cubiertas Vegetales.*
- [4] **Erazo, Rodrigo (2005).** “Variación de la conductividad térmica con la humedad en materiales de construcción”. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- [5] **Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau - FLL (2002).** *Guidelines for the Planning, Execution and Upkeep of Green-roof sites, release 2002.*
- [6] **Gomez, María Fernanda (2012).** “Adaptación de Distintas Asociaciones de Especies Nativas a Condiciones de Cubiertas Vegetales en la Zona Mediterránea Semiárida de Chile”. Proyecto de Título presentado como parte de los requisitos para optar al título de Ingeniero Agrónomo, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- [7] **Instituto Nacional de Normalización (2007).** NCh853-2007 “Acondicionamiento térmico – Envoltente térmica de edificios – Cálculo de resistencias y transmitancias térmicas”.
- [8] **Instituto Nacional de Normalización (2008).** NCh850-2008 “Aislación térmica - Determinación de propiedades de transmisión térmica en estado estacionario y propiedades relacionadas - Aparato de placa caliente de guarda”.
- [9] **Instituto Nacional de Normalización (2008).** NCh1079-2008 “Arquitectura y Construcción – Zonificación climático habitacional en Chile y recomendaciones para el diseño arquitectónico”.
- [10] **Getter, K.L. & Rowe, D.B. (2006).** The Role of Extensive Green Roofs in Sustainable Development. *HortScience* 41(5): 1276-1285.
- [11] **Getter, K.L. et al. (2007).** Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. *Ecological Engineering*, 31(4), 225-231.

- [12] Kumar, R., & Kaushik, S. C. (2005). Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings. *Building and Environment*, 40(11), 1505-1511.
- [13] Lazzarin, R. M. et al. (2005). Experimental measurements and numerical modelling of a green roof. *Energy and Buildings* 37, 1260-1267.
- [14] Loh, Susan. (2008). Living walls-a way to green the built environment. *BEDP environment design guide*, 1(TEC 26), 1-7.
- [15] Minke, Gernot. (2004). *Techos Verdes. Planificación, ejecución, consejos prácticos*. Editorial Fin de Siglo.
- [16] Moran, A. et al. (2004). A North Carolina field study to evaluate greenroof runoff quantity, runoff quality, and plant growth.
- [17] Niachou, A. et al. (2001). Analysis of the Green roofs thermal properties and investigation of its energy performance. *Energy and Buildings* 33, 719-729.
- [18] Oberndorfer, E. et al. (2007). Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions, and services. *BioScience*, 57(10), 823-833.
- [19] Oke, T. R. (1987). *Boundary layer climates* (Vol. 5). Psychology Press.
- [20] Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones – OGUC (2006). *Manual de Aplicación. Reglamentación térmica. Artículo 4.1.10*.
- [21] Pascual Constanza (2009). *Cubiertas Verdes*. Serie de documentos técnicos del Departamento de Ciencias de la Construcción de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Chile.
- [22] Sailor, D. J., & Hagos, M. (2011). An updated and expanded set of thermal property data for green roof growing media. *Energy and Buildings*, 43(9), 2298-2303.
- [23] Sailor, D. J. (2008). A green roof model for building energy simulation programs. *Energy and buildings*, 40(8), 1466-1478.

[24] Vera, S., Coonelly, M. & Devorak. B. "I Seminario Internaciona de Infraestructura Vegetal de Edificios: Experiencia Internacional y Nacional". Centro de extensión Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile. 13 y 14 de mayo de 2014.

[25] Von Stülpnagel, A. et al. (1990). The importance of vegetation for the urban climate. *Urban Ecology. Plants and Plant Communities in Urban Environments. SPB Academic Publication, The Hague, 175-193.*

[26] Otros

ASHRAE IWECC 1.1 – Santiago, Chile. International Weather for Energy Calculations. http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=3_south_america_wmo_region_3/country=CHL/cname=Chile. Revisado en mayo de 2014 por Michel Canales.

Green roof benefits: <http://greenroofs.org/index.php/about/greenroofbenefits>. Revisado el 21-05-2014 por Michel Canales.

Green walls benefits: <http://greenroofs.org/index.php/about/green-wall-benefits>. Revisado el 21-05-2014 por Michel Canales.

ANEXO A

Detalle resumido de los resultados obtenidos en el ensayo de laboratorio de los tres sustratos mezclados. Debido a que cada tabla contiene aproximadamente entre cinco mil y quince mil filas de datos, se adjunta el promedio de estos resultados.

Tabla 49: Registro de datos de los ensayos - parte 1.

Sustrato	P. 1 Cara Fria	P.1 Cara Caliente	Calef. Central	Calef. Guarda	P.2 Cara Caliente	P.2 Cara Fria	Temp. Amb.
1	16,5300	26,7000	26,8200	23,4500	26,7300	14,9100	21,0000
2	13,0476	23,8315	17,7147	20,5729	24,1423	13,8523	21,0000
3	14,0788	22,6123	22,7163	19,9099	22,7115	13,7482	21,0000

- P.1 Cara fría: Temperatura en la cara de la probeta 1 (inferior) en contacto con la placa fría (°C).
- P.1 Cara Caliente: Temperatura en la cara de la probeta 1(inferior) en contacto con la placa caliente (°C).
- Calef. Central: Temperatura del calefactor central (placa caliente) (°C).
- Calef. Guarda: Temperatura del calefactor de Guarda (anillo) (°C).
- P.2 Cara Caliente: Temperatura en la cara de la probeta 2 (superior) en contacto con la placa caliente (°C).
- P.2 Cara Fría: Temperatura en la cada re la probeta 2 (superior) en contacto con la placa fría (°C).
- Temp. Amb.: Temperatura ambiente del laboratorio, mantenida constantemente a 21°C durante los ensayos (°C).

Tabla 50: Registro de datos de los ensayos - parte 2.

Sustrato	V	A	Potencia	Delta T Inf.	Delta T Sup.	Delta T Promedio.
1	9,7000	1,0000	9,7000	10,1600	11,8200	10,9900
2	7,6000	0,9300	7,0680	10,7839	10,2900	10,5369
3	3,7000	0,4700	1,7390	8,5335	8,9633	8,7484

- V: Voltaje (V)
- A: Corriente (A)
- P: Potencia (VxA)
- Delta T Inf.: Diferencia de temperatura en la probeta inferior (°C).
- Delta T Sup.: Diferencia de temperatura en la probeta superior (°C).
- Delta T Promedio: Diferencia de temperatura promedio de ambas probetas. Promedio de Delta T Inf. Y Delta T. Sup. (°C).

Tabla 51: Registro de datos de los ensayos - parte 3.

Sustrato	Espesor	Conductividad	Temp. Media	Dif. CC.-CG.
1	0,0400	0,2336	21,2200	3,3700
2	0,0400	0,1741	18,7184	-2,8582
3	0,0400	0,0509	18,2877	2,8064

- Espesor: Espesor de las probetas (m).
- Conductividad: Conductividad térmica de los sustratos calculadas según la fórmula (5) con los datos de la tablas 49, 50 y 51
- Temp. Media: Temperatura media de las probetas. Promedio entre P.1 cara fría, P.1. Cara caliente, P.2 cara fría y P.2 cara caliente.
- Dif. CC.-CG: Diferencia de temperatura entre el calefactor central y el anillo de guarda.

ANEXO B

Resultados de la modelación en *DesignBuilder* para los pisos del 1 al 6 en el edificio. Caso base y techo verde.

Tabla 52: Diseño para la condición de verano. Edificio, piso 1 - caso base.

Zone	Total Cooling Load (kW)	Air Temperature (°C)	Time of Max Cooling	Area (m2)
Block1:Zone5	1,95	23	17:30	49,5
Block1:Zone3	1,58	23	17:30	49,5
Block1:Zone2	0,69	23	17:30	29,2
Block1:Zone4	2,11	23	16:30	49,5
Block1:Zone1	2,46	23	16:30	49,5
TOTAL	8,79			227,2

Tabla 53: Diseño para la condición de verano. Edificio, piso 1 - techo verde.

Zone	Total Cooling Load (kW)	Air Temperature (°C)	Time of Max Cooling	Floor Area (m2)
Block1:Zone5	1,95	23	17:30	49,5
Block1:Zone3	1,58	23	17:30	49,5
Block1:Zone2	0,68	23	17:30	29,2
Block1:Zone4	2,1	23	16:30	49,5
Block1:Zone1	2,45	23	16:30	49,5
TOTAL	8,76			227,2

Tabla 54: Diseño para la condición de verano. Edificio, piso 2 - caso base.

Zone	Total Cooling Load (kW)	Air Temperature (°C)	Time of Max Cooling	Area (m2)
Block2:Zone5	2,06	23	17:30	49,5
Block2:Zone3	1,69	23	17:30	49,5
Block2:Zone2	0,71	23	17:30	29,2
Block2:Zone4	1,88	23	17:30	49,5
Block2:Zone1	2,25	23	17:30	49,5
TOTAL	8,59			227,2

Tabla 55: Diseño para la condición de verano. Edificio, piso 2 - techo verde.

Zone	Total Cooling Load (kW)	Air Temperature (°C)	Time of Max Cooling	Area (m2)
Block2:Zone5	2,05	23	17:30	49,5
Block2:Zone3	1,69	23	17:30	49,5
Block2:Zone2	0,7	23	17:30	29,2
Block2:Zone4	1,88	23	17:30	49,5
Block2:Zone1	2,25	23	17:30	49,5
TOTAL	8,57			227,2

Tabla 56: Diseño para la condición de verano. Edificio, piso 3 - caso base.

Zone	Total Cooling Load (kW)	Air Temperature (°C)	Time of Max Cooling	Area (m2)
Block3:Zone5	2,06	23	17:30	49,5
Block3:Zone3	1,7	23	17:30	49,5
Block3:Zone2	0,72	23	17:30	29,2
Block3:Zone4	1,91	23	17:30	49,5
Block3:Zone1	2,27	23	17:30	49,5
TOTAL	8,66			227,2

Tabla 57: Diseño para la condición de verano. Edificio, piso 3 - techo verde.

Zone	Total Cooling Load (kW)	Air Temperature (°C)	Time of Max Cooling	Area (m2)
Block3:Zone5	2,06	23	17:30	49,5
Block3:Zone3	1,7	23	17:30	49,5
Block3:Zone2	0,72	23	17:30	29,2
Block3:Zone4	1,9	23	17:30	49,5
Block3:Zone1	2,26	23	17:30	49,5
TOTAL	8,64			227,2

Tabla 58: Diseño para la condición de verano. Edificio, piso 4 - caso base.

Zone	Total Cooling Load (kW)	Air Temperature (°C)	Time of Max Cooling	Area (m2)
Block4:Zone5	2,07	23	17:30	49,5
Block4:Zone3	1,71	23	17:30	49,5
Block4:Zone2	0,73	23	17:30	29,2
Block4:Zone4	1,92	23	17:30	49,5
Block4:Zone1	2,28	23	17:30	49,5
TOTAL	8,71			227,2

Tabla 59: Diseño para la condición de verano. Edificio, piso 4 - techo verde.

Zone	Total Cooling Load (kW)	Air Temperature (°C)	Time of Max Cooling	Area (m2)
Block4:Zone5	2,07	23	17:30	49,5
Block4:Zone3	1,71	23	17:30	49,5
Block4:Zone2	0,72	23	17:30	29,2
Block4:Zone4	1,91	23	17:30	49,5
Block4:Zone1	2,27	23	17:30	49,5
TOTAL	8,68			227,2

Tabla 60: Diseño para la condición de verano. Edificio, piso 5 - caso base.

Zone	Total Cooling Load (kW)	Air Temperature (°C)	Time of Max Cooling	Area (m2)
Block5:Zone5	2,08	23	17:30	49,5
Block5:Zone3	1,72	23	17:30	49,5
Block5:Zone2	0,74	23	17:30	29,2
Block5:Zone4	1,93	23	17:30	49,5
Block5:Zone1	2,29	23	17:30	49,5
TOTAL	8,76			227,2

Tabla 61: Diseño para la condición de verano. Edificio, piso 5 - techo verde.

Zone	Total Cooling Load (kW)	Air Temperature (°C)	Time of Max Cooling	Area (m2)
Block5:Zone5	2,08	23	17:30	49,5
Block5:Zone3	1,72	23	17:30	49,5
Block5:Zone2	0,74	23	17:30	29,2
Block5:Zone4	1,92	23	17:30	49,5
Block5:Zone1	2,28	23	17:30	49,5
TOTAL	8,74			227,2

Tabla 62: Diseño para la condición de verano. Edificio, piso 6 - caso base.

Zone	Total Cooling Load (kW)	Air Temperature (°C)	Time of Max Cooling	Area (m2)
Block6:Zone5	2,11	23	17:30	49,5
Block6:Zone3	1,75	23	17:30	49,5
Block6:Zone2	0,76	23	17:30	29,2
Block6:Zone4	1,96	23	17:30	49,5
Block6:Zone1	2,32	23	17:30	49,5
TOTAL	8,9			227,2

Tabla 63: Diseño para la condición de verano. Edificio, piso 6 - techo verde.

Zone	Total Cooling Load (kW)	Air Temperature (°C)	Time of Max Cooling	Area (m2)
Block6:Zone5	2,1	23	17:30	49,5
Block6:Zone3	1,74	23	17:30	49,5
Block6:Zone2	0,76	23	17:30	29,2
Block6:Zone4	1,95	23	17:30	49,5
Block6:Zone1	2,31	23	17:30	49,5
TOTAL	8,86			227,2