

Construcción De Una Cubierta Verde Extensiva Sobre Un Techo Inclinado A Cuatro Aguas En Un Ambiente Húmedo – Tropical, A Partir Del Modelado Y La Simulación De Variables Físicas.

Luis Miguel Augusto Martínez Afanador

272290

Alan Ricardo Gómez López

270413

Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga

Escuela De Ingenierías

Bucaramanga

2021

Construcción De Una Cubierta Verde Extensiva Sobre Un Techo Inclinado A Cuatro Aguas En Un Ambiente Húmedo – Tropical, A Partir Del Modelado Y La Simulación De Variables Físicas.

Luis Miguel Augusto Martínez Afanador

272290

Alan Ricardo Gómez López

270413

Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de:

INGENIERO INDUSTRIAL

INGENIERO CIVIL

Directores del Proyecto

MARYORY PATRICIA VILLAMIZAR LEON

LEONARDO BARÓN PÁEZ

Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga

Escuela De Ingenierías

Bucaramanga

2021

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos de Luis Miguel Augusto Martínez Afanador

Agradezco sobre todas las cosas, a mis padres por la confianza, la paciencia y el apoyo constante e incondicional durante todo el proceso, a los directores por la disposición y el apoyo durante todo este proceso, a la Universidad y especialmente al PhD Efraín Rodríguez del Instituto Colombiano de Petróleo-Ecopetrol, por compartir los registros meteorológicos durante toda la investigación, a mi compañera de vida quien a pesar de los retos que pone la vida me permitió compartir este logro tan importante, a mi compañero de tesis por el esfuerzo, las ganas y soñar alto, a mis amigos más cercanos quienes creyeron y siempre estuvieron ahí y por último a aquellos colaboradores indispensables para el desarrollo del proyecto.

Agradecimientos de Alan Ricardo Gómez López

Agradezco a Dios sobre todas las cosas, a mis padres por su apoyo incondicional desde el primer momento, a los directores por su apoyo fundamental, a mi familia por su compañía, a mis amigos más cercanos, también a la Universidad y al PhD Efraín Rodríguez del Instituto Colombiano de Petróleo-Ecopetrol por compartir información valiosa en todo el proceso y por último a los demás colaboradores que brindaron información importante en el desarrollo de nuestro proyecto

TABLA DE CONTENIDO

| | Pág. |
|--|------|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 15 |
| 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 18 |
| 3. JUSTIFICACIÓN..... | 22 |
| 4. OBJETIVOS..... | 26 |
| 4.1. Objetivo General..... | 26 |
| 4.2. Objetivos Específicos..... | 26 |
| 5. MARCOS DE REFERENCIA..... | 27 |
| 5.1. MARCO DE ANTECEDENTES..... | 27 |
| 5.2. MARCO CONCEPTUAL..... | 112 |
| 5.2.1. Aislamiento térmico..... | 113 |
| 5.2.2. Inercia térmica..... | 115 |
| 5.2.3. Cubierta verde..... | 116 |
| 5.2.4. Cubierta verde extensiva..... | 118 |
| 5.2.5. Cubierta verde extensiva según inclinación..... | 121 |
| 5.2.6. Transferencia de calor..... | 123 |
| 5.2.7. Radiación..... | 124 |
| 5.2.8. Convección..... | 127 |
| 5.2.9. Conducción..... | 133 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 5.2.10. | Estandarización de procesos..... | 136 |
| 5.2.11. | Simulación numérica no lineal..... | 137 |
| 5.2.12. | Plataforma Arduino..... | 140 |
| 5.2.13. | Distribución normal de probabilidad..... | 141 |
| 5.3. | MARCO LEGAL..... | 142 |
| 6. | DISEÑO METODOLÓGICO..... | 143 |
| 6.1. | Tipo de investigación..... | 144 |
| 6.2. | Recolección de datos iniciales..... | 144 |
| 6.3. | Análisis y toma de decisión de modelos existentes..... | 149 |
| 6.3.1. | Consideraciones generales del proceso de transferencia de calor..... | 149 |
| 6.3.2. | Selección del modelo de transferencia de calor..... | 153 |
| 6.3.3. | Ajuste de datos para toma de decisión del modelo..... | 177 |
| 6.3.4. | Estimación del error cuadrático medio..... | 178 |
| 6.4. | Decisión de especies de plantas, esparcimiento y prototipo..... | 179 |
| 6.5. | Refuerzo estructural de la estructura interna de la habitación..... | 187 |
| 6.6. | Modelo de optimización (no lineal) financiero para el proceso constructivo..... | 191 |
| 6.7. | Implementación de modelo en el lenguaje de programación R..... | 205 |
| 6.8. | Construcción de cubierta verde extensiva..... | 221 |
| 6.9. | Instalación de sistema de medición para recolecta de datos finales (Recolección de datos y monitoreo de variables)..... | 228 |

| | | |
|-----|-----------------------------------|-----|
| 7. | ACTIVIDADES PARA DESARROLLAR..... | 233 |
| 8. | RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 236 |
| 9. | CONCLUSIONES..... | 266 |
| 10. | RECURSOS – PRESUPUESTOS | 270 |
| 11. | REFERENCIAS..... | 273 |
| 12. | ANEXOS | 285 |

LISTADO DE ILUSTRACIONES

| | |
|---|-----|
| Ilustración 1. Vista aérea superior de la estructura a intervenir | 20 |
| Ilustración 2 - Plano en planta de cubierta existente y futura cubierta verde de 32.75 m ² | 20 |
| Ilustración 3 – Tasa de evapotranspiración para las condiciones de principios de verano en Pennsylvania | 59 |
| Ilustración 4 - Resultados temperaturas del suelo simuladas vs registradas | 63 |
| Ilustración 5 - Intercambio de calor por radiación en un tejado verde | 64 |
| Ilustración 6 – Discretización de una cubierta verde | 67 |
| Ilustración 7 - Puntos de calor y humedad en la cubierta vegetal | 68 |
| Ilustración 8 - Parámetros de entrada provenientes de otras literaturas de modelos de transferencia de calor | 73 |
| Ilustración 9 - Capas del modelo ilustradas en el FASST | 91 |
| Ilustración 10 – Clasificaciones según el tipo de cubierta verde | 117 |
| Ilustración 11 – Esquema de los componentes de un sistema típico de naturación en cubiertas verdes | 118 |
| Ilustración 12 – Listado plantas tipo “Sedum Tapizante” | 119 |
| Ilustración 13 – Listado de plantas que prosperaron | 120 |
| Ilustración 14 – Tipo de sistema adecuado con la pendiente | 121 |
| Ilustración 15 – Medidas de seguridad en función de la pendiente | 122 |
| Ilustración 16 - Distribución normal de probabilidad | 141 |
| Ilustración 17 - Esquema del desarrollo cronológico de la investigación en cuestión | 143 |
| Ilustración 18 - Temperaturas externas (teja arcilla) mes febrero 2020 | 145 |

| | |
|---|-----|
| Ilustración 19 - Temperaturas internas habitación mes febrero 2020 | 146 |
| Ilustración 20 – Instalación termómetro en el techo de la habitación | 147 |
| Ilustración 21 - Tabla resumen temperaturas críticas ambientes, exterior e interior meses febrero, marzo y abril 2020 | 149 |
| Ilustración 22 - Balance de energía del suelo..... | 155 |
| Ilustración 23 - Balance de energía del suelo..... | 159 |
| Ilustración 24 - Modelo de cubierta verde..... | 162 |
| Ilustración 25 - Circuito térmico para flujos de calor considerados en un modelo de cubierta verde sin capa vegetal ($S_f = 0$). | 168 |
| Ilustración 26 - Circuito térmico para flujos de calor considerados en una cubierta verde completamente vegetada ($S_f = 1$). | 170 |
| Ilustración 27 - Macetas iniciales de especie <i>Sedum Soleirolia Soleirolii</i> | 179 |
| Ilustración 28 - Propagación de las 3 macetas iniciales | 180 |
| Ilustración 29 - Traslado de bandejas y macetas desde el patio al techo | 181 |
| Ilustración 30 – Tamizaje de la tierra..... | 182 |
| Ilustración 31 - Expansión de tierra sobre plástico para evitar contacto directo con la superficie | 183 |
| Ilustración 32 - Resultado creación cultivo para generar tapete de <i>Sedum</i> en 4-5 meses..... | 183 |
| Ilustración 33 - "Molde" de manera y plástico como impermeabilización | 184 |
| Ilustración 34 - Base forrada con cartón plastificado y cartón de huevos como drenante | 185 |
| Ilustración 35 - Instalación tubo para desagüe y malla de anqueo como filtrante | 185 |
| Ilustración 36 – Sellado tubo desagüe y finalización de prototipo..... | 186 |
| Ilustración 37 - Chequeo estructural del elemento de madera | 188 |

| | |
|--|-----|
| Ilustración 38 - Adecuación de perfiles in situ previos al montaje | 189 |
| Ilustración 39 - Corte de muros para fundida de perfiles | 189 |
| Ilustración 40 - Instalación y fundida de perfiles | 190 |
| Ilustración 41 – Culminación labores de refuerzo..... | 191 |
| Ilustración 42 – Componentes sistema de naturación a instalar..... | 193 |
| Ilustración 43 – Ecuación general con la que el VAN se hace cero por medio del método de Newton-Raphson..... | 202 |
| Ilustración 44 - Diagrama de flujo de la simulación de la temperatura interior..... | 220 |
| Ilustración 45 – Aplicación de manto asfáltico con soplete de calor | 222 |
| Ilustración 46 - Montaje del marco de protección contra el deslizamiento del sustrato | 223 |
| Ilustración 47 - Instalación de marcos para anclajes y plataforma de la cubierta verde | 224 |
| Ilustración 48 - Instalación de plástico negro, lámina drenante y geotextil filtrante | 225 |
| Ilustración 49 - Adición del sustrato en toda la cubierta..... | 226 |
| Ilustración 50 - Instalación de plantas y terminación cubierta verde | 227 |
| Ilustración 51 - Fotografía aérea de la cubierta verde instalada dos semanas posteriores a la fecha del montaje final | 227 |
| Ilustración 52 – Adquisición de los componentes del sistema de medición | 231 |
| Ilustración 53 - Instalación de equipos de medición en el techo..... | 231 |
| Ilustración 54 - Temperaturas simuladas vs temperaturas ambientes registradas..... | 243 |
| Ilustración 55 - Histograma de frecuencias con el modelo realizado por Dmitrii Konkov..... | 244 |
| Ilustración 56 - Parámetros histograma con el modelo de Konkov | 245 |
| Ilustración 57 – Histograma del logaritmo de cada uno de los datos para observar su ajuste .. | 246 |
| Ilustración 58 - Histograma datos con el modelo de Tabares & Srebric..... | 247 |

| | |
|---|-----|
| Ilustración 59 - Parámetros de ajuste a la distribución normal con la formulación matemática | 247 |
| Ilustración 60 - Cuadrado de 5x5cm con 115 brotes | 250 |
| Ilustración 61 - Estimación de la proporción de área verde para 115 brotes | 250 |
| Ilustración 62 - Resultados simulación temperatura de la habitación | 252 |
| Ilustración 63 - Áreas identificadas de brotes para el cálculo de la variable Cobertura Fraccional del Follaje (Sf) en noviembre del 2020 | 255 |
| Ilustración 64 - Áreas sombreadas de los brotes identificadas para el cálculo de la variable Cobertura Fraccional del Follaje (Sf) en noviembre del 2020 | 255 |
| Ilustración 65 - Áreas identificadas de brotes para el cálculo de la variable Cobertura Fraccional del Follaje (Sf) en mayo del 2021 | 257 |
| Ilustración 66 - Áreas sombreadas de los brotes identificados para el cálculo de la variable Cobertura Fraccional del Follaje (Sf) en mayo del 2021 | 257 |
| Ilustración 67 - Áreas sombreadas de los brotes identificados para el cálculo de la variable usada (real) de Cobertura Fraccional del Follaje (Sf) en junio del 2021 en la unidad de vivienda con Maní Forrajero | 258 |
| Ilustración 68 - Áreas sombreadas de los brotes identificados para el cálculo de la variable usada (real) de Cobertura Fraccional del Follaje (Sf) en junio del 2021 en la unidad de vivienda con soleirola soleirolii | 258 |
| Ilustración 69 - Áreas sombreadas de los brotes identificados para el cálculo de la variable usada (real) de Cobertura Fraccional del Follaje (Sf) en junio del 2021 en toda la cubierta de la unidad de vivienda | 259 |
| Ilustración 70 - Temperaturas registradas antes y después de instalar la cubierta verde | 264 |
| Ilustración 71 – Demarcación para demolición de la pared | 313 |

| | |
|---|-----|
| Ilustración 72 – Proceso de demolición para conexión entre perfil y viga | 313 |
| Ilustración 73 – Instalación y fundida de viga adicional..... | 314 |
| Ilustración 74 – Pintura y soldadura de perfiles | 314 |
| Ilustración 75 – Instalación y conexión de perfil de refuerzo | 315 |
| Ilustración 76 – Soldado y fundido de perfiles..... | 315 |

LISTADO DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 1 - Costos de aplicación de la cubierta verde con productos Sika | 195 |
| Tabla 2 - Costos de aplicación de la cubierta verde con manto asfáltico 3.2mm | 197 |
| Tabla 3 - Flujos de fondo a lo largo de los 20 años de vida útil del proyecto con impermeabilización Sika | 198 |
| Tabla 4 - Flujos de fondo con la implementación de la opción económica..... | 199 |
| Tabla 5 - Cálculo de beneficios totales de la cubierta verde extensiva..... | 201 |
| Tabla 6 - Determinación de la TIR con la ecuación 7 por el método de tanteos | 201 |
| Tabla 7 - Determinación de la TIR con la ecuación 8 por el método de tanteos | 202 |
| Tabla 8 - Estimación de la TIR por Newton-Rapshon para la opción de componentes Sika | 203 |
| Tabla 9 - Estimación de la TIR por Newton-Rapshon para la opción con manto asfáltico..... | 204 |
| Tabla 10 - Listado de elementos para el sistema de monitoreo de las variables..... | 229 |
| Tabla 11 - Cotización sensores de medición de contenido volumétrico de agua | 229 |
| Tabla 12 - Costo sensor bluetooth para registro de datos | 230 |
| Tabla 13 - Actividades de apoyo para el cumplimiento de los objetivos | 235 |
| Tabla 14 - Temperaturas críticas (máximas y mínimas) estación ICP, cubierta habitación e interior de esta..... | 240 |
| Tabla 15 - Tabla resumen temperaturas máximas y mínimas registradas en la habitación con presencia de cubierta verde..... | 263 |
| Tabla 16 - Temperaturas máximas y mínimas antes y después de instalada la cubierta verde . | 265 |
| Tabla 17 - Costos completos de toda la investigación incluyendo construcción y gastos generales | 272 |



RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

- TITULO:** Construcción De Una Cubierta Verde Extensiva Sobre Un Techo Inclinado A Cuatro Aguas En Un Ambiente Húmedo – Tropical, A Partir Del Modelado Y La Simulación De Variables Físicas.
- AUTOR(ES):** Luis Miguel Augusto Martínez Afanador
Alan Ricardo Gómez López
- PROGRAMA:** Escuela de Ingenierías
- DIRECTOR(A):** Maryory Patricia Villamizar León - Leonardo Barón Páez

RESUMEN

La investigación consistió en la construcción de una cubierta verde extensiva sobre un techo inclinado que permitiera la reducción de la temperatura interna de una habitación en una vivienda en el área metropolitana de Bucaramanga. Esto se logró a partir de la investigación de los modelos validados, selección de los más adecuados al caso de estudio con base en la capacidad de definir y/o medir las variables de entrada y la adaptación del modelo matemático que mejor represente los tres tipos de transferencia de calor. Además, se realizó un modelo de optimización financiera para determinar la mayor tasa interna de rentabilidad (en el proceso constructivo) a lo largo de la vida útil del proyecto obteniendo una TIR del 10.64%. Finalmente, se logró identificar una reducción representativa en las temperaturas máximas de la habitación de 5.83°C al instalar la cubierta verde junto a un error cuadrático medio RMSE de 9.54°C al comparar los datos simulados con medidos experimentalmente.

PALABRAS CLAVE:

Cubierta verde, transferencia de calor, RMSE, optimización (no lineal) financiera y tasa interna de rentabilidad.


V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO



GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: Construction Of An Extensive Green Roof On A Pitched Four-Slope Roof In A Humid-Tropical Environment, Based On Modeling And Simulation Of Physical Variables.

AUTHOR(S) Luis Miguel Augusto Martínez Afanador

Alan Ricardo Gómez López

PROGRAM(S): Escuela de Ingenierías

DIRECTOR(S): Maryory Patricia Villamizar León - Leonardo Barón Páez

ABSTRACT

The following research studies consist of the construction of an extensive green roof on an inclined ceiling that enables the reduction of the internal temperature of a room in a house in the metropolitan area of Bucaramanga. This was achieved by reviewing verified existing models, selecting the most fitting for this research based on the ability to define and/or measure input variables and the adjustment of the mathematical model that best represents the three heat transfer methods. Furthermore, a financial optimization model was carried out to define the highest internal rate of return (in the construction process) throughout the useful life of the project, obtaining an IRR of 10.64%. In the end, it was possible to recognize a demonstrative fall in the maximum room temperatures of 5.83 ° C after installing the green roof jointly with a root mean square error RMSE of 9.54 ° C when comparing the simulated data with those measured experimentally.

KEY WORDS:

Green roof, heat transfer, RMSE, financial optimization (non-linear) and internal rate of return.

Two handwritten signatures in black ink. The first signature is 'Maryory Patricia Villamizar León' and the second is 'Leonardo Barón Páez'.

V° B° WORK OF GRADE DIRECTOR(S)

INTRODUCCIÓN

Durante muchos años la sostenibilidad ha estado ligada con el crecimiento económico global, sin embargo, este mismo incremento genera tanto avances sociales positivos como indicadores ambientales negativos, a lo largo del tiempo. Uno de los indicadores no favorables ha ido creciendo en simultaneo con la transformación de las superficies de suelo naturales (vegetación) por estructuras como edificios, parqueaderos y caminos, que generan una alteración en los ciclos del agua y del aire (Dellepiane, 2014).

Meadow et al. (1972) por medio del estudio titulado “Los límites del crecimiento” mencionan que existe una relación marcada entre los indicadores económicos y los ambientales, sin embargo, hoy en día la situación es un poco diferente pues dichos límites pueden ser cuantificados con el “área de territorio necesaria para la producción de los recursos por una población o de una persona” tal como lo menciona (Rees, 1996). Es de mencionar que esa relación debería ser lo más baja posible o de lo contrario se superaría de manera excesiva la capacidad ecológica tal como lo está ocurriendo actualmente, pues de acuerdo con (Vilches et al., 2014) es necesario 2,8 hectáreas por habitante para la fabricación de los recursos naturales para una sola persona, es decir, que en el mundo la capacidad de generación de los insumos necesarios para una persona está por encima ya que la huella ecológica de la tierra alcanza a ser de 1,7 hectáreas por habitante.

Adicional, es de considerarse que la industria de la construcción en cualquier país tiene una relación estrecha con la evolución y creación de infraestructura vías, edificaciones, instalaciones hidrosanitarias, entre otras más, y en los que también trasciende la cultura y el crecimiento económico de la población. Hacia el año 2007 el sector de la construcción aportó 4.7 trillones de dólares a la economía mundial y aportando el 10% del PIB global (Aguilar et al., 2020) y para el

caso de Colombia la construcción aporta el 5,8% del total del PIB entre los otros sectores (DANE, 2009).

El sector constructivo es responsable de la modificación y actualización del planeta y también uno de los principales actores de la contaminación debido a que consume el 40% de las materias primas en el mundo o bien 3000 millones de toneladas por año (Acevedo et al., 2019) al igual que en el caso del agua potable que requiere del uso del 17% del total disponible y el 25% de la madera que se cultiva. Conjuntamente la construcción produce residuos sólidos mundiales por un valor aproximado del 30%, por lo tanto, es de suma importancia aplicar métodos sostenibles que logren reducir la cantidad de recursos naturales y de residuos, debido a que los espacios para la disposición final se agotan con el pasar del tiempo (Naciones Unidas, 2007).

En adición, el incremento de la isla de calor hoy día es causado por la urbanización, la alteración del estado natural de las superficies y las variaciones en los componentes de la atmósfera debido a la emisión de gases (Angel Ejade, 2008) lo cual va ligado también que hoy día cerca del 50% de la población del mundo habita en las áreas urbanas de las ciudad y se espera que esta cantidad incremente al 61% para al año 2030 (Morales Santiago & Uzcátegui Mojica, 2017) lo que generaría una reducción en sustratos naturales al ser reemplazados por caminos, parqueaderos y múltiples edificaciones (Dellepiane, 2014). Toda esta urbanización genera un efecto llamado isla de calor el cual es descrito como el incremento registrado en las temperaturas en el interior de las ciudades en comparación en las áreas rurales y naturales alrededor de las mismas (Díaz, 2017).

De acuerdo con (Sailor, 2008) el fenómeno de isla de calor genera consecuencias de gran magnitud a nivel ambiental, económico y social pues entre mayor sea la temperatura mayor serán la emisión de gases a la atmósfera y de la misma manera el consumo de energía.

Por tal razón, es importante inculcar prácticas sostenibles que conserven los recursos naturales como la creación de edificaciones verdes, debido a que es una de las prácticas más importantes en la actualidad para disminuir impactos ambientales que son generados por el incremento masivo en las edificaciones (Cidell, 2009). Esta práctica sostenible aplicable en edificaciones también genera una medida eficiente para la reducción de las islas de calor presentes en las ciudades a causa del consumo energético producido por los aires acondicionados (Chanampa et al., 2010) a causa de las altas temperaturas producto del incremento de las urbanizaciones.

Placitelli (2012) menciona también que las cubiertas verdes “son una herramienta ecológica que tenemos más a mano para iniciar la reversión del mercado producto del deterioro del ambiente que sufren las ciudades”. Dichos sistemas de cubiertas verdes pueden ser usados en todo tipo de edificaciones, ya sean antiguas o nuevas, aportando impactos positivos en el medio ambiente y generando en las ciudades una disminución del efecto de isla de calor, el cual ocasiona una sensación térmica mayor a la temperatura que se pueda llegar a registrar en horas críticas.

De acuerdo con Alexandri & Jones (2009) se ha demostrado a través de una serie de investigaciones que la instalación de una cubierta verde puede aportar en algunos climas reducciones de temperatura de 2 a 6°C en horas nocturnas y de 6 a 8°C en horas diurnas e inclusive si se llegase a implementar en todas las ciudades, estas podrían llegar a generar disminución en la temperatura general y a su vez, en los costos energéticos (Kosareo & Ries, 2007).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las altas temperaturas en las ciudades conllevan al uso excesivo de sistemas de refrigeración y por tanto el consumo energético, lo que ocasiona problemas de salud en la población. Comúnmente se usan estos sistemas de cubiertas verdes de refrigeración para mitigar las altas temperaturas en la ciudad, debido a que existe un paradigma ligado a la tradición ingenieril de construir techos en concreto y otros elementos con alta conducción térmica. El hecho de contar con componentes con estas características y elementos meteorológicos desfavorables hace que las condiciones de temperatura comúnmente sean elevadas. Lo que afecta paralelamente la humedad relativa, por tanto, las condiciones de confort del residente.

En el caso desarrollado, existe una cubierta convencional a cuatro aguas construida con madera Zapan y Pino Ciprés con teja española en un ambiente húmedo-tropical en el área rural de la ciudad de Floridablanca Santander, donde los residentes, debido a las altas temperaturas presentadas día a día en el interior de la habitación principal de la edificación, acuden a métodos de refrigeración tales como aire acondicionado o uso de ventilador para mitigar el efecto mencionado.

Estas temperaturas son causadas por el aumento en las construcciones con hormigón armado que a su vez generan un gran impacto en el efecto invernadero y reducen notoriamente las áreas verdes las cuales cumplen muchas funciones como regulación de la temperatura y humedad, reducción efecto isla de calor, mejoramiento de la calidad del aire, capacidad de retención de agua, entre otro más (García Villalobos, 2010). Estas situaciones de reducción en las zonas verdes se presentan de manera constante a medida que se genera una hegemonía de la industria y como ya se mencionaba y por tanto acuden a métodos para disminuir las altas temperaturas en los hogares

los cuales por un lado sí cumplen la función de disipar, pero por el otro siguen proporcionando aumentos en las temperaturas ambientes y las islas de calor.

Estos fenómenos de aumentos de las temperaturas a causa de las construcciones que reducen notoriamente las zonas verdes inician desde el momento en que las personas que viven en las áreas rurales se trasladan hacia las zonas urbanas generando la necesidad del levantamiento masivo de grandes edificios, generando de esta manera la islas de calor urbana y a su vez un aumento de la temperaturas de las ciudades en comparación con el entorno (Rosatto et al., 2016).

Con base en lo anteriormente descrito, se planteó la pregunta de investigación: ¿Cuáles son los factores determinantes para tener en cuenta desde el punto de vista técnico y de variables físicas que permita el desarrollo óptimo de una cubierta verde extensiva (CVE) con el fin de lograr la reducción de temperatura interna en una edificación en el AMB?

Por otro lado, el techo en servicio a cuatro aguas donde se planteará construir la cubierta verde tiene una extensión de 32.75 m² aproximadamente y se muestra una vista superior obtenida con un Drone a continuación y también un plano detalle aproximado realizado mediante el software de diseño asistido por computador AutoCAD tal como se puede apreciar en las ilustraciones 1 y 2 a continuación donde, se resalta el área a implementar la cubierta verde con recuadro rojo:



Ilustración 1. Vista aérea superior de la estructura a intervenir

Fuente: Propia

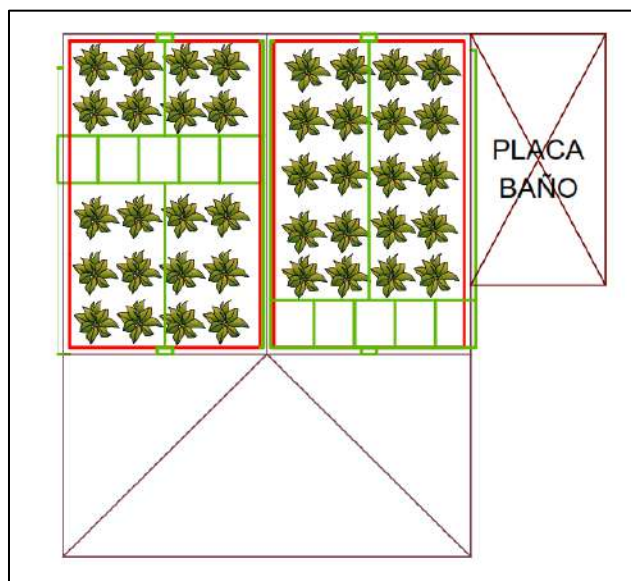


Ilustración 2 - Plano en planta de cubierta existente y futura cubierta verde de 32.75 m²

Fuente: Propia

El problema de investigación de este proyecto buscó determinar factores técnicos y variables físicas que incluyan fuerzas impulsoras del calor y la humedad, la energía, temperatura, evapotranspiración y la radiación exterior, flujo de agua y valor en el cultivo y energía asociada al mismo tal como lo planteó Konkov (2018) en su investigación, así como también Tabares (2009) buscó el desarrollo del mismo.

Para el presente, se le denomina un desarrollo tecnológico y cuenta con el siguiente alcance de investigación:

- Diseñar y construir una cubierta verde extensiva (CVE) en un área efectiva de **32.75 m²** en un techo inclinado. Únicamente interviniendo en dos de las cuatro aguas de la sección del techo existente con una pendiente de 44% o 23°
- Se respetará las limitantes estructurales del techo en servicio (cargas permisibles diseño estructural actual).
- Se realizará el proyecto en una edificación ubicada en el Área Metropolitana de Bucaramanga.
- Tiempo de evaluación y análisis (Temperaturas internas y funcionamiento de la CVE) para el sistema de cubierta verde construido, de 1 mes.
- No se llevará cabo un estudio exhaustivo de la vegetación a emplear, se manejarán estándares.
- Se construirá además un sistema de acceso para el mantenimiento a lo largo de la vida útil de la estructura.

JUSTIFICACIÓN

Hoy día, las empresas del sector de la construcción en Colombia utilizan el concreto como el principal componente en la realización de sus proyectos. En la zona delimitada, es usual observar techos o cubiertas inclinadas y horizontales, tanto convencionales (planos) como inclinadas. Donde estas últimas consisten en un sistema de cubierta el cual sobrepone diversas capas (aislante e impermeabilizante) sobre la placa de hormigón, la cual en el caso de cubierta convencional corresponde a la última capa de la edificación.

El uso del concreto en estos sistemas como primera opción hace que se pierda día a día el paisajismo y las zonas verdes en una ciudad en crecimiento. Al mismo tiempo hace que incremente la posibilidad de generar aumentos significativos en efectos como el de transferencia de calor entre los materiales de la cubierta, islas de calor o del albedo, como también disminución en efectos como la inercia o la resistencia térmica interna (Piqueras, 2016); lo que conlleva a incremento en las temperaturas y cambios respecto a la humedad relativa tanto en el medio ambiente como al interior de una edificación.

Además, existe un nicho de mercado limitado o pequeño con respecto a alternativas de construcción, al menos identificado en la región delimitada. Esto conlleva al incremento de la temperatura en regiones cálidas con poca variación de las condiciones meteorológicas y por lo tanto a la necesidad de hacer uso de recursos no renovables como la energía eléctrica por medio de equipos de refrigeración para obtener condiciones de confort en una residencia, oficina, almacén, etc. Pues no se considera viable en muchos casos la implementación de sistemas de construcción sostenible.

Dicho esto, el hecho de considerar estas alternativas para garantizar el bienestar del residente implica en muchos casos ignorar el factor ambiental y también aquellas alternativas aplicables que pueden brindar efectos significativos siendo amigables con el medio ambiente, donde este último va de la mano con el enfoque que está adquiriendo el sector de la construcción cómo lo refleja (Argos, 2010) en sus cinco tendencias planteadas para el 2020, donde la apuesta por la sostenibilidad sigue siendo un pilar fundamental para el desarrollo y crecimiento. Así mismo, los POT (Planes de Ordenamiento Territoriales) municipales de Colombia tiene contemplados los 17 objetivos de desarrollo sostenible creados por la Organización de las Naciones Unidas (ONU).

Sin embargo, no existe ninguna normativa reglamentada que obligue a llevarlos a cabo. El *(Objetivo 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles | El PNUD En Colombia, n.d.)* plantea que a pesar que para el 2050 se tendrán 6500 millones de personas en zonas urbanas, razón por la cual aumentarán las edificaciones y por consecuencia los impactos sobre la temperatura, la industria y entidades gubernamentales se encuentran enfocando fuerzas para el aumento de la urbanización inclusiva y sostenible para el año 2030, donde la planificación y gestión cumplirán un papel importante a la hora de operar proyectos ya sea nuevos como en servicio.

Las metas 3 y 6 se relacionan con la construcción sostenible y proyectan mejoras en el sector. La meta 3 plantea que hacia el 2030 se aumentará la urbanización inclusiva y sostenible junto a la posibilidad para planificar y gestionar asentamientos humanos integrales y sostenibles. Para la meta 6 se espera reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades de diversas maneras, enfocándose principalmente en la atención a la calidad del aire y la gestión de desechos municipales y de otro tipo.

Sumado a esto, es necesario contemplar el impacto del sector en la economía del país y por lo tanto de los residentes o clientes potenciales. Como lo refleja (McKinsey & Company, n.d.) en el

congreso Colombiano de la Construcción 2017 a CAMACOL, la cadena de valor de la construcción representa el 13 % del PIB mundial, es decir alrededor de 9.5 trillones de dólares; y aunque en Colombia corresponde a un 6.5% del PIB, la construcción dinamiza cerca de 30 subsectores de la economía que se destacan como factores importantes generadores de cambio la movilidad, el tiempo, la conectividad y el medio ambiente (*Panorama y Evolución Del Sector de La Construcción En Colombia*, n.d.).

Por otro lado, en zonas de alta temperatura, es común emplear el uso de sistemas de refrigeración, pero a pesar del alivio temporal que generan estos al contrarrestar las altas temperaturas y humedad relativa, existen problemáticas tanto de micro como macro impacto que terminan a largo plazo afectando tanto el confort del residente como de la comunidad o entorno.

Justamente, para regiones con clima cálido - templado, las altas temperaturas internas en las ya existentes y nuevas edificaciones, ha llevado al consumo masivo de energía eléctrica, por medio del uso de ventiladores y sistemas de aire acondicionado. El uso desmedido e intensivo de los sistemas de refrigeración puede representar daño para la salud afectando la calidad del aire, pues al haber acumulación de gérmenes u otro tipo de sustancias orgánicas por falta de revisión y limpieza, pueden generarse efectos como asma o EPOC (Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica).

También, los sistemas de aire acondicionado pueden reducir la humedad relativa a menos del 30%, lo que puede causar sequedad de las mucosas nasales e irritación generando por lo tanto problemas como la faringitis (*Los Riesgos Del Aire Acondicionado y Cómo Protegerlos de Ellos* - *BBC News Mundo*, n.d.).

Además, plantea (Rossi et al., n.d.) que al interior de los edificios, la calidad del aire depende del uso de los sistemas de refrigeración, pues el uso de estos conlleva a la proliferación de

microorganismos llamados “bioaerosoles” y se propagan con gran facilidad a través del sistema de aire acondicionado. Tanto la hipersensibilidad como las enfermedades infecciosas están asociadas a estos microorganismos.

En adición, está comprobado que la capa de ozono filtra la radiación ultravioleta procedente del sol, lo que conlleva a la disminución de la temperatura. Actualmente, se presenta reducción en la concentración de ozono en distintas zonas; esto es atribuido principalmente por el uso del compuesto CFC (Clorofluorocarbonos) presentes en refrigerantes (Echeverría & Miguel, 2009), que a pesar de que se encuentran vetados, siguen presentes en los sistemas de refrigeración antiguos.

Además, este compuesto actúa como un catalizador de las reacciones de destrucción de ozono, por lo cual se puede concretar que a medida que se empleen en mayor número de sistemas de refrigeración, mayor será la reducción de la concentración del ozono y por consiguiente las temperaturas de las ciudades tenderán a ser elevadas. Por lo tanto, la presencia de estos compuestos en la atmósfera y el uso desmedido de los sistemas de refrigeración contribuyen al efecto invernadero y al aumento en la temperatura.

Concluyendo, se logró identificar un efecto común en las grandes ciudades. El efecto de islas de calor en zonas urbanas. Este se relaciona directamente con el albedo, su influencia en el proceso de transferencia de calor y depende explícitamente de la superficie en análisis y sus propiedades. Dicho efecto, genera incrementos de temperatura en zonas urbanas y suburbanas debido a la gran cantidad de áreas pavimentadas o construidas con concreto y el calentamiento progresivo de las mismas (García Villalobos, 2010).

OBJETIVOS

.1. Objetivo General

Diseñar una cubierta verde extensiva a partir del modelado y simulación de las variables físicas asociadas a la transferencia de calor que permitan la estandarización del proceso de construcción con el fin de reducir la temperatura interna del área en estudio de una edificación.

.2. Objetivos Específicos

- .2.1.** Analizar los modelos de transferencia de calor que permitan identificar la estructura apropiada de los mismos para la construcción de una cubierta verde extensiva basándose en las condiciones del entorno y teniendo en cuenta conceptos de termodinámica.
- .2.2.** Caracterizar las propiedades de una cubierta convencional frente a una cubierta verde extensiva.
- .2.3.** Formular el modelo que permita simular las variables físicas asociadas a la transferencia de calor con el fin de estandarizar la magnitud de estas.
- .2.4.** Construir una cubierta verde extensiva de acuerdo con los resultados obtenidos de la simulación para su posterior validación.
- .2.5.** Optimizar desde el área financiera el proceso de construcción.

MARCOS DE REFERENCIA

3. MARCO DE ANTECEDENTES

Inicialmente se considera la investigación realizada por Porsche & Köhler (2003) donde se llevó a cabo una comparación sobre los costos del ciclo de vida de las cubiertas verdes entre Alemania, USA y Brasil, en la cual identificaron características claves para la toma de decisión en la implementación de una cubierta verde extensiva, comparándola con una cubierta intensiva, una con sellado de bitumen o techo de asfalto y una en grava, teniendo en cuenta tanto los diferentes beneficios, como los factores técnicos y ambientales. Respecto al costo por metro cuadrado en Alemania fue de \$ 85 USD, el doble de una cubierta convencional el cual es similar a USA, mientras que, en Brasil, este valor corresponde aproximadamente a un 30% de dicho monto.

En contraste, Albarracín (2016) menciona que las estructuras de cubiertas verdes nuevas con pendientes entre 30° y 45°, con capas de 20 cm de césped y capas de corteza de árbol selladas con alquitrán, pueden tener una vida útil aproximada entre 15 y 70 años en promedio.

Conviene mencionar que parte del éxito de la extensión del tiempo de vida útil de la estructura, implica invertir en su conservación. Por ello, se realizó un análisis comparativo sobre el mantenimiento por 90 años para una cubierta de 100 m² en cuatro tipos de escenarios. Según esta comparación, los costos de inspección y mantenimiento asociados y planteados por metro cuadrado son: techo de bitumen con \$ 18 usd/m², seguido del techo de grava con \$ 18 usd/m², luego está la cubierta verde extensiva con \$ 90 usd/m² y, por último, la inspección y mantenimiento para el techo verde intensivo con un costo de UDS \$ 720/m².

Por tanto, se puede apreciar que el menor costo asociado a mantenimiento y durabilidad es para los techos de asfalto y grava respectivamente, con un costo por metro cuadrado de 18 USD. Al contrastar las dos alternativas de construcción verde, se encontró un costo de mantenimiento para la cubierta verde extensiva de 630 USD/m² por debajo de la intensiva, debido al poco mantenimiento por parte de la cubierta verde extensiva y la ausencia de un sistema de riego.

De manera análoga, Porsche & Köhler (2003) analizaron otros factores benéficos en la implementación de una cubierta verde como lo es la reducción de carga al sistema de alcantarillado pluvial, donde una cubierta verde con 10 cm de sustrato con un coeficiente de escorrentía de 0,5 (German FLL-Guideline for the Planning, Execution and Upkeep of Green-Roof Sites) puede reducir en un 50% dicho nivel, en contraste a un techo convencional. Adicionalmente, se evidencia una mejora con respecto al aislamiento térmico de una edificación, el cual depende del clima, la velocidad del viento, la cantidad de agua en las capas subyacentes y el flujo de agua a través de la capa de drenaje.

Aunque calcular el aislamiento térmico es complejo, existen factores que influyen en la protección térmica como factores de transferencia de calor y convección. Con base en esto, se genera una relación donde cada 10 cm de capa de cubierta vegetada equivale a 5 cm de material aislante comúnmente utilizado, de modo que los valores de aislamiento se mejoran en un 25% con una amplia vegetación en la cubierta.

Otro de las ventajas que ofrece una cubierta ajardinada, es la reducción de la transmisión del sonido, donde se define que, con un sustrato de 20 cm de espesor, es posible mejorar la absorción de sonido hasta 46 dB aproximadamente, lo que se relaciona con lo planteado por Garcia (2010) dónde se encontró una relación de espesor del sustrato y la intensidad del sonido (dB), la cual

consiste en que la absorción acústica de la capa de sustrato con espesores de 12 cm y 20 cm asciende a 10 dB y 46 dB, respectivamente.

De igual modo en el mismo estudio se determinó a través de otras encuestas realizadas a habitantes de grandes ciudades de Alemania, altos niveles de satisfacción al contar con vegetación en sus barrios (entre el 70% y 80%), pues a pesar de que la construcción verde o sostenible en ese país ha ido en auge a lo largo de los últimos 30 años, y la población ha disminuido, se ha doblado la cantidad de superficie sellada o construida, perdiendo cada vez más zonas verdes.

Finalmente, se debe añadir un último factor: el aumento del valor de la propiedad, ya que si bien se presenta una debilidad en los mercados inmobiliarios, dado los bajos niveles de alquiler y la disminución de ocupación, también es cierto que las mayores rentas en las grandes ciudades de los países objeto de análisis, oscilan entre \$200 USD y \$550 USD, esto genera el aumento de dichas cifras, solamente en edificaciones con cubiertas extensivas e intensivas dada la reducción de la cuota por disminución de carga al alcantarillado para cubiertas extensivas lo que se traduce en aumento de 2.700 \$ USD únicamente por poseer una cubierta verde intensiva (Porsche & Köhler, 2003).

Contrastando con esos criterios mencionados, en la Guía de Techos Verdes de Bogotá de 2011, se generalizan o estandarizan 3 tipos de beneficios (Secretaría distrital de ambiente de Bogotá, 2011). Primero, ambientales, donde se encuentra la mitigación del efecto isla de calor, la reconstrucción del paisaje natural y el fomento a la biodiversidad. El segundo, sociales, al brindar espacios utilizables y de recreación, favorecedor para la salud tanto física como mental, alivio visual y educación ambiental. Tercero, económicos, involucrando la reducción del consumo energético y costos de operación, lo que mejora las condiciones de confort y aumenta la productividad, al permitir producir alimentos y productos agrícolas para el autoconsumo o venta.

En una investigación adicional, donde también se menciona la relación costo-beneficio de la implementación de un sistema de tejado verde propuesto por Moreno et al. (2014), se ofrece una alternativa óptima con base en las características de las cubiertas del sector de Yomasa (Bogotá) mediante recipientes individuales apoyados en las cubiertas existentes con su determinado diseño y sistema de riego con el fin de aportar a la seguridad alimentaria de los habitantes y comercializar los productos sembrados para ingresos adicionales. En este estudio, obtuvieron una relación costo-beneficio por metro cuadrado de \$36.438 COP, considerando impactos positivos de carácter ambiental, económico y social, entre los cuales resalta el aumento en el valor de la propiedad y la captura de metales pesados del aire ($0.2 \text{ kg de PM}_{10} * \text{m}^2$).

Aunado a lo expuesto, se adiciona que en los diseños de cubiertas verdes se tienen en cuenta los estructurales, de modo que se toma en consideración la propuesta de Barragán (2016) donde propuso una alternativa de una vivienda Eco-sostenible que considera las distintas cargas que estas pueden aportar a la estructura existentes y simultáneamente buscaban generar un cambio en la mentalidad del sector constructivo de tal modo que se construyan viviendas ambientalmente sostenibles para así mejorar la calidad de vida de sus residentes. De ahí que uno de los diseños de los sistemas sostenibles realizados a escala sea una cubierta verde en tres diferentes tipos de estructuras.

La primera es un techo verde con losa y correas metálicas que aporta una carga total de 370 kg/m^2 ; la segunda opción para el sistema es una cubierta con losa maciza con un aporte de 590 kg/m^2 ; y por último una cubierta ajardinada en placa fácil y bloquelón con una carga total de aporte de 411 kg/m^2 . La elección del sistema a implementar fue el sistema con placa fácil compuesta por perfil metálico y bloquelón, pues este respeta las condiciones de carga de la estructura. Mientras

que el desarrollo del prototipo, los techos verdes contribuyen a la disminución de la temperatura interior en un intervalo de 3 a 6°C y reducen costos asociados al uso de sistemas de refrigeración.

En el desarrollo de otro proyecto de construcción propuesto por Albarracín (2016) se indagó acerca de las implicaciones estructurales que conlleva la construcción de una cubierta verde; encontrando que los pesos no difieren tanto en comparación con los de una cubierta convencional, por lo que no se requiere de diseños especiales ni de reforzamientos para implementarlas. Por otra parte, hallaron que el peso máximo aproximado aportado por una cubierta verde en estado de saturación está entre 150-200 kg/m², de forma que, al compararse con la investigación desarrollada por Barragán (2016), se observa que el diseño de la carga máxima aportada en estado de saturación se encuentra dentro de los límites propuestos en el diseño de la vivienda eco-sostenible en el municipio del Alto, Magdalena en Colombia.

Enfatizando en el tema de costos de cubiertas, Albarracín (2016) también realizó un estudio de mercados en diferentes empresas que se encuentran actualmente en Colombia (Groncol, Jardineros, Terreno, Bigon y Echotelhado) con relación a la implementación de cubiertas verdes, a partir del cual se determinó información enfocada en el costo por metro cuadrado tanto del diseño arquitectónico, como del material de vegetación con alturas de más de 50 cm, además sustrato existente, mano de obra, sistema de riego y mantenimiento una vez por año; todo ello para obtener un precio por metro cuadrado promedio de construcción de \$ 225.000 y un costo de mantenimiento de \$ 20.000 anual.

En esta investigación que se trae a colación se creó un documento de apoyo en la Universidad de Manchester como guía en la instalación y mantenimiento de techos verdes en el campus por Rose (2014) donde se presentaron algunos de los costos involucrados en la instalación de una cubierta ecológica a excepción de aquellos relacionados con instalaciones en las alturas y

asimismo, mencionan que los costos de mantenimiento varían de acuerdo con la actividad a realizar sobre esta, ya sea deshierbar, regar, limpiar, entre otros. Por tal motivo, los costos de una cubierta verde extensiva, con sistema de riego sin incluir instalación por m^2 , se hallan aproximadamente en €130, equivalente a \$ 530.611 COP.

Continuando con la revisión de proyectos de investigación acerca de los costos que conlleva la implementación de cubiertas verdes extensivas, Borges (2018) en la Universidad de Alicante examinó este tipo de estructura como una alternativa económica y sostenible frente a las cubiertas tradicionales. Allí, la determinación de costos inicia con el cálculo de la transmitancia térmica para así conocer las pérdidas de calor a las que estaría sometida el elemento constructivo, ya que esto depende de la conductividad térmica y del espesor de los materiales que la componen.

Dicho cálculo inicialmente fue realizado en la cubierta construida por el autor, seguido de un ejercicio comparativo con otros tipos de cubiertas implementadas en zonas aledañas a la de estudio. Los tipos de techos vegetales seleccionados por los autores fueron: cubierta plana invertida no transitable con acabado de grava, cubierta plana invertida transitable con pavimento fijo, cubierta plana invertida no transitable con protección de grava y aislamiento de poliuretano y cubierta inclinada con acabado de teja curva.

Luego de determinar la transmitancia térmica con un espesor de 6cm en el aislante en todos los escenarios, se obtuvo que la cubierta inclinada con acabado de teja es la que mayor flujo de calor genera con $U=0.52 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, seguido de la cubierta plana invertida no transitable con protección de grava con $U=0.35 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, continuando con la cubierta plana invertida transitable con pavimento fijo con una transmitancia de $0.34 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; siendo los dos restantes, aquellos escenarios en los cuales se arrojan los menores valores de trasmisión, dado que la cubierta plana invertida no transitable de grava con aislamiento de poliuretano sólo alcanzó $0.31 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ y la

cubierta verde de tipo extensivo con un espesor de sustrato de 15cm dio como resultado una transmitancia térmica de $0.24 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Estos valores son contrastados con los límites de transmitancia térmica dados por el Código Técnico de la Edificación (CTE) en el Documento Básico de Ahorro de Energía con un máximo de $0.45 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ en cubiertas y un valor recomendado orientativo para cada elemento de $0.33 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

Es decir que, con base en los límites y recomendaciones anteriores en relación con la transmitancia térmica dados por el CTE, se constató que todas las cubiertas con el mismo espesor de aislamiento térmico cumplen con el límite estipulado de $0.45 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ a excepción de la cubierta inclinada con lana de roca. En cambio, en cuanto al valor recomendado de transmitancia térmica, se observa que solamente la cubierta plana con poliuretano proyectado respeta esta restricción.

Ahora bien, Borges (2018) procedió a determinar el espesor necesario del aislante para igualar al valor de transmitancia térmica obtenido por la cubierta verde construida ($0.24 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), concluyendo así que para la cubierta plana invertida no transitable con protección de grava será necesario emplear un espesor del aislante de 11cm.

Para el estudio económico de los costos de ejecución de la cubierta verde estudiada y las otras tipologías para la comparación de resultados, Borges extrajo precios del Instituto Valenciano de Edificación (IVE) obteniendo los siguientes valores para las distintas tipologías: 68.26 €/m^2 para una cubierta verde de tipo extensivo con espesor de sustrato de 15cm y 6cm del espesor de aislante, 69.86 €/m^2 para la cubierta plana invertida no transitable con protección de grava y espesor del aislante XPS de 11cm y 71.49 €/m^2 para la misma cubierta sólo que con un espesor de 12cm, 75.01 €/m^2 para la cubierta plana invertida no transitable con protección de grava y espesor de 9cm en el aislante de poliuretano, 78.95 €/m^2 para la cubierta plana invertida transitable con pavimento

fijo y espesor de 11cm en el aislante XPS y 80.58 €/m² para la misma cubierta pero con un espesor de 12cm, y finalmente un costo de 97.04 €/m² en una cubierta inclinada con acabado de teja y 16 cm de espesor en el aislante de lana de roca, seguido de 111.75 €/m² para la misma cubierta sólo que con 10cm de espesor y con aislante de poliuretano.

De esta manera, Borges concluyó que resulta mucho más viable la implementación de una cubierta verde con el menor espesor de aislamiento debido a que la resistencia térmica se mantiene, pues el aumento entre el techo verde extensivo de 15cm y la cubierta plana invertida no transitable con protección de grava con 11cm de XPS aumenta solamente en un 2.34%, en comparación con el aumento excesivo que hay entre el techo verde y la cubierta inclinada con acabado de teja y 10cm de poliuretano proyectado el cual corresponde al 63.71%. [Para una mejor comprensión de los costos y espesores de las diferentes cubiertas analizadas se recomienda ver Anexos: Figura 1].

Continuando con el estudio de los costos de las cubiertas ajardinadas, Benavides (2007) realizó un modelo de optimización financiera, el cual trata acerca del cálculo de la TIR por el método de interpolación lineal, de tanteos y de Newton – Raphson, donde es imperativo hacer el cálculo en el momento inicial del proyecto para establecer las ganancias o pérdidas que podrían generarse tanto a corto como a largo plazo según sea el caso. Adicionalmente, propuso un flujo de fondos en el tiempo, el cual integra datos de egresos (costos totales) e ingresos (beneficios totales) durante los periodos analizados y con base en esto poder aplicar los distintos métodos.

La primera metodología es a través de la Interpolación Lineal iniciando con la asignación de diferentes valores a la tasa de interés de tal modo que cada uno refleje un VAN que pueda ser ilustrado. Luego de obtener la gráfica, se toman dos valores que sean subyacentes tanto por encima como por debajo del punto de corte de la curva con el eje de las abscisas y se calcula nuevamente los VAN con esos intereses de ambos valores. Después de esto, se procede a hacer una gráfica de

ese par de puntos para que por medio de semejanza de triángulos pueda obtenerse la fórmula definitiva de la TIR a emplear en este método.

$$TIR = I_{menor} + \left(\frac{I_{MAYOR} - I_{menor}}{|VAN_{Imayor} - VAN_{Imenor}|} \right) * VAN_{Imenor} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Finalmente, para hacer el cálculo de la TIR, se requiere en primer lugar datos de factor de actualización calculado con su respectiva fórmula para las dos tasas (halladas con los valores subyacentes al eje de las abscisas) en cada uno de los periodos a analizar, en segundo lugar, el respectivo flujo actual neto que sale de multiplicar el flujo de fondos por el factor de actualización y por último se procede con el cálculo de un VAN y una TIR. Este método de interpolación lineal tendrá más exactitud en la medida en que los VAN hallados por la tasa menor y mayor impuesta sean más cercanos a cero donde se destaca que, en contraste con otros métodos, no es impreciso.

El siguiente método estudiado por Benavides es el de los Tanteos, el cual parte de la ecuación del VAN ajustada al flujo de fondo respectivo. Una vez se tenga la fórmula, se procederá a asignar diferentes valores al interés de modo que el VAN se aproxime a cero. Dicho procedimiento se realiza tantas veces como sea posible de manera que pueda encontrarse una TIR que genere un VAN muy cercano a 0. Asimismo, el método puede desarrollarse por el Solver de Excel de forma que genere las iteraciones necesarias para poder hallar la TIR respectiva.

El último método es el de Newton Raphson, el cual se realiza a través de la ecuación del VAN, pero con la particularidad de que se generan resultados más confiables con menor tiempo de cálculo con respecto de la interpolación. El procedimiento inicia con la ecuación del VAN ajustado al flujo de fondo. Acto seguido, se calcula la tasa con la que el Valor Actual Neto equivale a cero. Sin embargo, es a través de la fórmula propuesta por Newton Raphson y es la siguiente:

$$I_{j+1} = I_j - \frac{VAN(I_j)}{VAN'(I_j)} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde I_j es el valor impuesto de la tasa, $VAN(I_j)$ es el VAN calculado con la tasa impuesta (I_j) y $van'(I_j)$ es la primera derivada del VAN calculado con la tasa impuesta.

En aras de completar las expresiones de la ecuación propuesta por Newton Raphson, deberá calcularse la derivada de la $VAN'(I_j)$, es decir, hallar el denominador de la expresión para completar todos los términos en la expresión de Newton Raphson. Seguido de esto, se procede a generar las diferentes iteraciones asignando un valor a la tasa de interés inicial I_j y posteriormente se irá hallando la diferencia con el I_{j+1} hasta que se vuelva cero y, en este punto, es cuando terminan las iteraciones de Newton Raphson y se habrá calculado la TIR que hará que el VAN se vuelva cero. La particularidad del método radica en la posibilidad que ofrece para ir determinando la tasa en menor tiempo, pues de acuerdo con la investigación de Benavides, se puede apreciar que desde la cuarta corrida ya había un valor muy cercano a cero.

Se debe agregar que los análisis de costo-beneficio de proyectos han sido caracterizados como una herramienta útil para la evaluación de los aspectos positivos y negativos de diferentes alternativas de inversión. En el estudio de Morales & Uzcátegui (2017), el cual consistió en el diseño y factibilidad económica de una propuesta de techo verde para un edificio en la Universidad Industrial de Santander (UIS), realizaron una evaluación económica del proyecto donde se tuvieron en cuenta beneficios como el ahorro en el consumo energético, mantenimiento para la capa impermeable del techo verde, y reducción de CO₂, mientras que para los costos o egresos se citó la inversión del proyecto, consumo energético y la impermeabilización hecha en 20 años posteriores a la fecha de instalación. En ambos escenarios se toma en consideración el consumo

energético, debido a que para el caso de los ingresos representa un ahorro del 25% aproximadamente en relación con el consumo una vez instalado el techo ajardinado.

Es necesario recalcar que la (TIR) para este proyecto fue del 12% a lo largo de 40 años de vida útil del diseño de la cubierta ajardinada, lo cual genera un retorno sobre la inversión de 9 años, 1 mes y 21 días, por lo que los autores lo consideran como rentable.

Más adelante, se encuentra la variación del cálculo de la TIR desarrollado por Mohammed & Eltahir (2017), donde por medio de una investigación en métodos de la determinación de este rendimiento como el de Bisección y Newton-Raphson, donde en este último citan que la precisión tiene una convergencia cuadrática al duplicar los dígitos en cada iteración.

Sin embargo, resaltan que este método tiene convergencia para escenarios por que puede presentar puntos de inflexión entre una iteración a otra, lo cual esto generaría complicaciones a la hora de determinar la raíz exacta, ya que comúnmente se inicia la determinación de la TIR con valores extremos, ya sean positivos o negativos y dependiendo de qué tan cerca se refleje el resultado con respecto al rendimiento, se va disminuyendo o aumentando dichos valores extremos de manera gradual con tal de generar acercamiento al cero. Aun así, este método no puede ser tenido en cuenta para el proyecto en cuestión, debido a que este caso es argumentable para los escenarios donde los flujos de caja son positivos; situación que no se presentaría en este proyecto.

En contraste con los estudios relacionados anteriormente que hablaban sobre los costos de las cubiertas verdes, se examinó una investigación llevada a cabo en la ciudad de Buenos Aires por Rosatto et al. (2016) en la cual se pretendía determinar si, dadas las condiciones climáticas de esa ciudad, las cubiertas vegetadas aportarían una regulación a la temperatura en los meses de enero y febrero, cuando estacionalmente se presentan los mayores valores.

Para comprobar esto, construyeron dos cubiertas verdes en la azotea de un edificio, dejando de manera una capa permeable como “testigo” de comparación; una de las cubiertas con sistema de riego y otra sin sistema de riego. Asimismo, se realizó la instalación de sensores de temperatura para poder registrar ésta en los meses de mayores fluctuaciones (enero y febrero). Los resultados de la investigación mostraron que, al presentarse diferencia significativa al interior de la edificación se logra alcanzar disminuciones en la temperatura de hasta 3.3° dentro del edificio, concluyendo así que construir una cubierta vegetada si puede ser un aporte a la regulación térmica de las edificaciones mejorando a su vez las condiciones de confort.

En cuanto al confort térmico, se toma en cuenta el planteamiento de Wang (2001), que lo define como un estado mental en donde el individuo reconoce su satisfacción con respecto al entorno térmico. En términos de sensaciones, este confort corresponde a una sensación de no estar ni muy cálido ni muy frío. Ahora bien, partiendo de la escala de sensación térmica de 7 puntos, propuesta por ASHRAE (The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), donde: -3 = Frío, -2 = Bien, -1 = Ligeramente bien, 0 = Neutral, +1 =Ligeramente cálido, +2=Cálido y +3 = Caliente; Wang (2001) calculó la pérdida de calor para una persona cómoda, experimentando sensaciones neutrales (0) con una determinada temperatura de la piel (T_{sk}) y una sudoración regular (Ersw).

Por otro lado, la pérdida de calor calculada (L), se comparó con la tasa metabólica (M). De modo que si $L = M$, quiere decir que el individuo en estudio se siente cómodo, mientras que si $L > M$, este individuo siente frío y en el caso contrario, es decir, si $L < M$, el individuo se siente cálido. Wang desarrollo una ecuación con la cual pudo conocer y definir la clasificación de la escala para los 7 niveles de satisfacción donde la tasa metabólica M y la pérdida de calor se encuentran en unidades de $Btu/h \cdot ft^2$.

$$PMV = (0.303 * e^{(-0.036 M)} + 0.276) (M - L) \quad (\text{Ecuación 3})$$

De igual forma, Wang encontró que, para las condiciones de confort térmico, se ven involucrados 6 factores; Temperatura del aire (T_a), Temperatura media radiante (T_{rad}), Humedad relativa (HR), velocidad del aire (V), tasa metabólica (M) y el aislamiento térmico asociado a la ropa (R_{cl}), los cuales variarán en cuanto el cuerpo sea sedentario, tenga actividad media o alta para un tercer escenario.

A fin de que hallar los valores de temperatura óptima o que cumplan con altos estándares de confort, investigadores han realizado diversas pruebas para determinar los efectos de la velocidad del aire sobre la temperatura adecuada o favorita dentro de una habitación según el confort térmico de los habitantes tomando en consideración los siguientes valores: una tasa metabólica de $M=400$ Btu/h (117 W), aislamiento térmico generado por la ropa de $R_{cl}=0,6$ clo y una humedad relativa dentro del cuarto del 50%.

De dicho “experimento” a través de 8 instituciones se pudo concluir una relación directa entre la temperatura interna de una edificación y la velocidad del aire para condiciones de confort, así como la gran influencia en las temperaturas internas bajas, generada por variación de esta última variable [ver Anexos: Figura 2]. No obstante, a lo expuesto, mantener o garantizar condiciones óptimas de confort en un proyecto de construcción en muchos casos es despreciable.

En cuanto a materiales que permitan garantizar condiciones de confort, se tiene que el hormigón armado a través de la historia, ha hecho parte de la mayoría de las obras civiles, desde elementos estructurales hasta la misma envolvente del edificio (a partir del siglo XIX). Sin embargo, los cerramientos en hormigón no brindan necesariamente el mejor desempeño térmico, por lo que Piqueras (2016) realiza una comparación de 4 sistemas o casos, analizando el

comportamiento térmico de acuerdo con las características de la estructura y distribución de los aislantes implementados.

Para ello, se tiene en cuenta en la fundamentación teórica, el concepto e importancia del aislamiento térmico y su relación con las sensaciones de confort. Este término relaciona aspectos asociados a la transferencia de calor como lo son la resistencia térmica, la cual se considera de gran importancia a la hora de aislar energía como el flujo de calor y su estrecha relación con la densidad de flujo, siempre teniendo en cuenta la importancia de la resistencia individual de los elementos que compongan el sistema.

Se examino, además, el concepto de inercia térmica en el cual se estudia su participación a la hora de definir las variaciones de temperatura según la hora. Todo ello a través del funcionamiento de un muro junto con su capacidad tanto de acumular como de liberar energía durante el día y la noche. De ahí se infiere que, ante la carencia en un cerramiento, cualquier cambio en el exterior será apreciado significativamente en el interior.

De modo accesorio, Piqueras (2016) realiza el análisis de 4 casos, donde el primero (caso 1) corresponde a una capilla arquitectónicamente llamativa en términos de diseño, ubicada en Alemania, en la cual se determina un muro sin aislante térmico y con un espesor de muro mayor a 50 cm para garantizar un comportamiento térmico óptimo en términos de confort. Para el segundo caso (Caso 2), se considera colocar un aislante térmico (panel prefabricado de GRC) exterior con la capa subyacente de hormigón en un centro de creación contemporánea en España, con el fin de estabilizar la temperatura interna independiente a la externa o ambiente.

Lo anterior, es debido al aprovechamiento de la inercia térmica, ya que el hormigón al tener el aislante como una especie de “barrera”, no se somete a una fuerte expansión térmica y, por lo

tanto, no transfiere tan fácilmente la energía adquirida al interior de la edificación. Inclusive, para este escenario en especial, existe una contribución con respecto a la inercia térmica del hormigón con un aislamiento térmico a largo plazo y sensación de calidez.

Conforme a la información desglosada, cabe añadir que el Caso 2 posee una estrecha relación (inversa) en términos de diseño con el cuarto caso, para el cual se planteó la opción de un aislamiento térmico (panel cartón-yeso) en la parte interior de un museo en Brasil con el propósito de agilizar o acelerar la rapidez de climatización en el hábitat, así como de amortiguar el sonido de manera eficaz. Dicha relación consiste en el comportamiento de la inercia térmica del hormigón.

En lo que atañe al caso 3, se construyó la envolvente con hormigón (*in situ*) a una fase y se colocó el aislante durante la dosificación del hormigón, dejándolo en el medio de los muros respectivos para un edificio de la universidad de Navarra, España.

Como resultado de la investigación, puntualmente respecto del tercer caso, el cual contempla la opción con mayor cantidad de carencias térmicas a causa de la interrupción, bien sea del forjado o por parte de cualquier elemento estructural al poner los cortes de aislantes rígidos, se concluye que existen secciones que no pueden cubrirse con el aislante térmico, ocasionando el surgimiento de conflictivos o puentes térmicos significativos por ende, una dependencia con el clima en aquellos casos donde las condiciones meteorológicas son muy exigentes. Por esta razón se recomienda como solución, la construcción del muro en dos hojas distintas para garantizar cubrimiento total por parte del aislante lo que incrementaría significativamente el y el tiempo de ejecución en conjunto con la impermeabilización externa frente al tema de las condiciones meteorológicas, lo que implicaría costos adicionales y un mantenimiento especial.

Por otro lado, se destaca otro factor relevante asociado a la implementación de una cubierta verde el cual corresponde a la factibilidad de los costos e implicaciones ligadas al mercado de acuerdo con el estado y crecimiento de este. Con base en esto, se pone en conocimiento un plan de negocios realizado por Johnson et al. (2013) donde se muestra una serie de problemas presentados en Guayaquil, los cuales podrían ser solucionados mediante aumento de las áreas verdes. En dicho estudio, inicialmente se logró identificar que los hogares de la ciudad registran el mayor consumo de energía eléctrica, con un promedio mensual de 182,41 kWh debido a que se encuentra localizada en la costa de Ecuador, donde emplean sistemas de refrigeración con mucha frecuencia.

A lo anterior, se suma la dificultad de que más del 50% de la población a la cual le fueron aplicadas las encuestas no conocen acerca de las prácticas ambientales, dejando a disposición de los investigadores realizar la debida comercialización del concepto y sus variables para impactar en el nicho de mercado de interés, mediante la implementación de diversas estrategias como la matriz de Ansoff, la cual tiene como fin identificar las oportunidades de crecimiento empresarial y llevarlas a cabo para mejoras organizacionales, donde el desarrollo de mercado, la diversificación y la penetración serían de principal interés para el caso de estudio (Peris, Rueda, and Benito n.d.).

En el estudio citado, el objetivo principal propuesto por Johnson et al. (2013) consistía en demostrar la factibilidad de especializar una compañía (Eco-Roofs) en la adecuación y construcción de techos verdes. Propósito para el cual implementaron estrategias a través de la propuesta de valor por medio de encuestas destinadas a familias con ingresos (mensuales) mayores a \$ 1.200 dólares que vivan en Guayaquil, propietarios de viviendas con techo de losa de hormigón donde mencionan los múltiples beneficios que trae consigo la instalación de una cubierta verde mostrando, a su vez, los costos que conlleva ejecutar dicha obra.

Los resultados de las encuestas realizadas, los cuales tienen diferentes enfoques, son los siguientes: inicialmente se obtuvieron que el 44.68% de las viviendas están construidas con tejas de zinc, seguido de las losas de hormigón con un 29.69%; lo que quiere decir que más del 50% de la población habita sobre viviendas cuyos principales materiales de las cubiertas son aquellos que absorben mayor calor y además encontraron que el 97.8% de la población entrevistada afirmó que la conservación del ambiente es necesaria.

En contraposición, el 80.85% de la muestra afirmó que estaría dispuesta a invertir más de \$ 750 USD en la instalación de una cubierta verde; y por último lograron establecer que, del total de datos recolectados, el 71.4% estarían dispuestos a implementar un techo verde con el cual se obtengan beneficios adicionales a los de la cubierta actual. Por lo tanto, el estudio de mercados proporcionó una visión en cuanto a los precios de la empresa con calidad alta y precio medio, otorgando consecuentemente un alto valor al servicio ofrecido.

Por otra parte, al construir una estructura de cubierta verde se debe tener en cuenta el factor de viabilidad, el cual puede ser determinante. En cuanto a esto, la guía número 4 elaborada por Área Metropolitana del Valle de Aburrá & Universidad Pontificia Bolivariana (2015) en conjunto con las políticas públicas de construcción sostenible del mismo municipio propusieron 3 niveles de priorización y cada uno contiene diferentes criterios que debe cumplir para que un proyecto de sostenibilidad sea económicamente viable.

El primer nivel de priorización establece tres criterios; el primero de ellos es que un proyecto sostenible no puede generar sobrecostos de inversión, sino que debe contribuir a la reducción de los mismos; el segundo menciona que la fase de planeación y diseño tampoco pueden generar sobrecostos en honorarios, siempre y cuando se tenga la capacidad de satisfacer la necesidad del proyecto y no sea necesario realizar una subcontratación para esto; y por último el tercer criterio

menciona que si se generan sobrecostos por una consultoría en sostenibilidad, estos se podrán compensar con menores costos en la etapa constructiva.

Dejando de lado las pautas requeridas para evaluar la viabilidad económica del proyecto, Zapata (2011) presento distintos conceptos de confiabilidad aplicados a proyectos de ingeniería. Uno de ellos es Reliability y es definido como la probabilidad de que un sistema cumpla la función designada durante el tiempo estipulado en las condiciones dadas. Igualmente, determinó que, para obtener un alto nivel de confiabilidad en un proyecto cualquiera, será necesaria una alta inversión en el mismo, por lo que se genera una relación directa entre estos dos factores [Ver anexo: Figura 3]. Dicho nivel de confiabilidad varía en función de las necesidades de los usuarios y a su vez lo que ellos estén dispuestos a invertir.

Del mismo modo, se citaron entidades que regulan la confiabilidad de los diseños, fabricación y operación hoy día. Las entidades más asociadas a nivel de componentes son: American Association Of Mechanical Engineers (ASME), National Fire Protection Association (NFPA), Underwriter Laboratories (UL) y por último el Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC). Ahora, a nivel de sistemas, se encuentra la Comisión de Regulación de Energía y Gas junto a Superintendencia de Servicios Públicos que son entidades que se encargan de regular y vigilar la electricidad y el gas, así como los servicios públicos domiciliarios, respectivamente.

Dejando de lado el contexto de confiabilidad y entidades asociadas al mismo, la investigación de Ortega et al. (2010), en la cual se planteó tanto el diseño e implementación de una cubierta verde extensiva sobre un edificio ubicado al sur de Ciudad de México. Una de las razones para elegir este tipo de cubierta, fue debido a la radiación solar directa que se aplica sobre la fachada. Asimismo, receptaron datos de una estación meteorológica la cual se encontraba cerca de la zona de estudio percatándose que el valor máximo de temperatura externa medido por esta es de 26.2°C

y contrastando este dato con las mediciones internas, se encontró que la temperatura interna de la habitación se encuentra 4.8°C por encima al valor máximo dado por la estación meteorológica.

Además, con la finalidad de estudiar las condiciones térmico-atmosféricas para determinar a qué estaría sometida la cubierta vegetal; se incluyeron las siguientes variables dentro de su estudio: en primer lugar, la radiación solar medida por la estación dejando en evidencia que los mayores valores se presentan en el mes de abril y mayo con 800 y 757 w/m², respectivamente; en segundo lugar, la precipitación, observando que la máxima fue en el mes de julio con 133.4mm. En tercer lugar, fue notorio que la máxima humedad relativa se dio en el mes de julio, agosto y septiembre con el 64%.

Para cerrar, tanto la velocidad y la dirección del viento más alta se dio en el mes abril con 2.98 m/s. Seguidamente fueron seleccionadas las especies a plantar, tomando en cuenta cuatro criterios: 1) especies de mínimo mantenimiento, 2) plantas de color rojo, verde, morado y verde grisáceo para valorar los niveles de transmitancia (cantidad de energía que atraviesa un cuerpo), reflectancia y absorción de la radiación de onda corta, 3) especies brillantes y opacas que relacionadas con la reflectancia y por último 4) especies de porte bajo y alto en edad adulta.

Luego del análisis, Ortega et al. (2010), encontró que las plantas que cumplían con los criterios de selección son: *Seatcreasea purple queen* (niña en barco), *Sedum x rubritinctum* (dedos de niño), *senecio cineraria* (cenizo) y *mesembryanthemum educe* (dedo moro). Aunado a ello, los materiales empleados para la estructura de soporte fueron analizados en un laboratorio con base en sus propiedades térmicas para garantizar el máximo beneficio la cual se haya compuesta por: a) una capa de emulsión base como impermeabilizante, b) una geomembrana anti-raíz y c) un geo-compuesto para el drenaje.

En Contraste con esto, otra investigación basada en determinar el diseño de una cubierta vegetal teniendo como referencia máximas temperaturas, radiación solar, precipitación, humedad y velocidad del viento, se referencia la guía de beneficios de los sistemas de techos verdes propuesta por Garcia (2010), donde se menciona que las capas de una cubierta vegetal deben ser: soporte base, membrana impermeabilizante anti-raíz, capa drenante, capa filtrante, capa de sustrato y capa de vegetación. Asimismo, para un modelo artesanal con pocos criterios técnicos, como el que se plantea en un caso objeto de estudio en la ciudad de Manchester propuesto por Rose (2014), se identificó que encima de una estructura o tablero de manera, debe verificarse la presencia de las capas enunciadas a continuación: marco de soporte analizado, membrana anti-raíz, sustrato (arcilla expandida, arena y compostaje) y capa vegetal (*Sedum mix*).

El escenario precedente, tratándose de una cubierta semi-intensiva de 15.2 m² en un techo inclinado sobre el cual se usaron especies de plantas perennes y *Sedums*, caso en el que se halló susceptibilidad al secado por parte de la cubierta en época de verano, por lo que un negocio local tomó la iniciativa del riego. Sin embargo, el techo alcanzó a sufrir periodos de estrés a causa del calor en épocas cálidas, afectando parte de su vegetación y sustrato de manera significativa por lo que se consideró necesario el reemplazo de cierta población de especies afectadas. A razón de ello, durante la retroalimentación se concluyó, como falla principal, el no haber preguntado a los comerciantes locales si estaban dispuestos a realizar acciones de riego, lo cual provocó la problemática previamente mencionada.

Otra investigación asociada al análisis de factores de una cubierta vegetal pero en este caso, con el diseño e implementación de una simulación, fue la realizada por Machado et al. (2000), donde valiéndose del concepto de balance térmico y los procesos asociados a transferencia de calor, se pudo determinar el valor de conductividad térmica equivalente del sustrato y capa vegetal

para diferentes escenarios en Madrid y Maracaibo, respectivamente. Para ello, se determinaron los elementos que influyeron en los resultados, los cuales corresponden temperatura externa e interna, radiación solar, así como la velocidad o movimiento del aire.

Tales elementos ayudan a definir estados de confort, de modo que las temperaturas oscilan entre los 18° C y 29. 5° C, siendo los máximos y mínimos. Para dicha labor, se tuvo en cuenta, datos de la estación meteorológica más cercana junto a datos de temperatura entre las capas de una cubierta según sus especificaciones, a saber, extensiva por medio de 6 sensores instalados entre cada capa para medir el comportamiento de la conductividad térmica.

De esta manera y teniendo como base adicional las interacciones entre la superficie de la cubierta vegetal y factores como la temperatura, humedad, radiación solar, entre otras, se logró encontrar el valor de conductividad, generando tres ecuaciones con base a los datos de la cubierta verde analizada. Una primera ecuación donde se analizó la resistencia térmica de los materiales, la segunda asociada al flujo de calor por conducción y la tercera consideró el balance energético entre la cubierta y el medio ambiente con base en el estudio de las condiciones exteriores, temperatura superficial, temperatura del aire, emisividad y nubosidad.

Precisamente, gracias a estos datos obtenidos por medio de los sensores y los procesos de evotranspiración y fotosíntesis la transferencia de calor por convección entre el aire exterior y la masa de aire al interior de la capa vegetal junto con la transmisión de calor de los materiales que conforman la cubierta del edificio y aplicando la Ley de Fourier, es posible calcular la ecuación de balance térmico para la cubierta verde obteniendo el valor más preciso para la conductividad térmica equivalente.

En consecuencia, se logró encontrar una diferencia entre los valores de temperatura calculados con base a los obtenidos de manera experimental de 3°C y 4°C por debajo, pues dada la existencia de un elemento estructural debajo de la capa más interna haciendo las veces de un aislante térmico efectivo. Allí, los escenarios variaron de acuerdo con la composición del techo (C1. extensivo, C2. extensivo e C3. intensivo sobre losa nervada, C4. cubierta con aislamiento interior y C5. exterior), junto al tiempo de apertura de las ventanas, permitiendo el flujo del aire y, por lo tanto, los cambios respectivos de velocidad de este.

A razón de ello, se considera útil el método, tanto para determinar cargas totales, como para medir la evolución de la temperatura interna de la edificación respectiva. De hecho, se recurrió al uso del índice de confort propuesto por Fanger, Predicted Mean Vote (PMV) y el porcentaje de satisfechos para determinar la efectividad con respecto al bienestar térmico (Wang, 2001). Para época de verano (Julio) se presentan valores de temperaturas medias en la zona de confort, configurando las ventanas abiertas durante todo el día con 25.3 ° C y con las ventanas cerradas desde las 10 a las 20 horas con temperatura de 22.2 ° C. Con el objetivo de obtener el porcentaje de satisfechos para el caso con las ventanas cerradas en el periodo de 10 horas fue necesario disminuir la velocidad del aire interior de 0.5 a 0.15 m/s para alcanzar un nivel de satisfacción del 90% mientras que para el otro caso se logró uno de 75%.

Cabe mencionar que el presente proyecto de investigación está enfocado en una cubierta intensiva, sin embargo, se evidencia que para el caso de Machado et al. (2000) se demostró que esta posee el mejor comportamiento térmico debido a su sustrato de 30 cm el cual brinda un 95% de inercia térmica efectiva, protegiendo a la edificación de la radiación por la capa vegetal, tal como se puede evidenciar [ver Anexo: Figura 4 y Figura 6], donde este tipo de cubierta permanece estable sin sufrir grandes fluctuaciones, generando una estabilidad térmica a condiciones mínimas

de confort. No obstante, en épocas cálidas es posible observar, por parte de las cubiertas ajardinadas (extensivas e intensivas), un comportamiento casi igual desde que empieza a incrementar la temperatura, de modo que, ambos escenarios actúan como si tuvieran aislamiento externo, por lo que, a pesar de su fluctuación, se mantienen en zonas de confort óptimas [ver Anexo: Figura 5 y Figura 7].

Se debe añadir que en la Figura 4 cómo influye a corto plazo la presencia de un aislante térmico interno, pero sin brindar estabilidad térmica al sistema. Situación que igualmente se evidencia en el caso de Maracaibo (edificios cerrados durante el día y abiertos en la noche) para el mes de enero [ver Anexo: Figura 6]. En síntesis, al analizar las cubiertas con aislamiento térmico tanto en el interior como en el exterior, en climas cálidos, salta a la vista los mismos valores de resistencia térmica para los dos, por ende, se tiene el mismo comportamiento gráfico [ver Anexo: Figura 5 y Figura 7].

Ahora bien, un estudio realizado por Alchapar, Correa, & Alicia (2018) en Argentina llevó a las investigadoras a querer mitigar lo que ellas llaman: sellamiento intensivo de las superficies de la ciudad, dado que genera desequilibrio en el balance térmico de los espacios urbanos y afecta las temperaturas (aire y superficies) de las estructuras, valiéndose de simulaciones (S) de los factores: temperatura del aire (T_a), velocidad del viento (V_v), humedad relativa (HR), temperatura del suelo (T_{suelo}) y temperatura media radiante (T_{mr}), para compararlas con datos medidos u observados (O) de dos tipos de cubiertas (reflectiva y cubierta verde) por medio del software ENVI-met a través de 32 escenarios diferentes (16 de H/W:0,3 y 16 de H/W:1,5) con el fin de darle validez y precisión a la simulación empleada. Se encuentra a lo largo de la investigación que, respecto a la T_a , ocurre una reducción cuando aumenta la reflectancia (albedo) de las vías, siendo óptima cuando el albedo en las superficies verticales es bajo, pero en las superficies horizontales es alto.

Además, hallaron una diferencia entre las cubiertas verdes y las reflectivas, respecto a la reducción de temperatura de 0,2 K, determinando que los recintos urbanos con menor T_{mr} (temperatura media radiante), poseen bajo albedo en las vías y en las fachadas (Horizontales y Verticales). Además, observaron una relación directa de la V_v con la vegetación urbana y altura de la estructura, donde la curva de V_v vs Altura(m) [ver Anexos: Figura 8], evidencia su influencia de estas en el incremento de la V_v , de acuerdo con la altura de la edificación correlativamente.

Enfocándose en otros aspectos, Tabares (2009) realizó un estudio en el cual extrajo fracciones de diferentes documentos científicos que hay en la actualidad cuyo enfoque principal son los modelos de transferencia de calor y de masa de los materiales que componen una cubierta verde con objetivo de reducir el consumo energético de la edificación, con lo cual desarrolló un modelo predictivo a basándose en los diferentes estudios que se han hecho a lo largo de la historia. Sin embargo, destaca que la gran mayoría de esos modelos no se han podido verificar, debido a los altos costos de los equipos para realizar todas las mediciones necesarias, por lo que fue el modelo “Cold plate”, que simula todas las condiciones ambientales adecuadas para la recopilación de la información necesaria controlando parámetros de flujo de aire, temperatura y humedad, que representan son casi estables en un ambiente exterior.

Cabe mencionar, que Tabares (2009) analizo todos los estudios que se encuentran en la actualidad sobre el modelo de transferencia de calor y de masa de cubiertas vegetales y a la vez fue descartando uno a uno hasta quedarse con los más sobresalientes y poder diseñar el modelo con base en los otros estudios y su posterior validación a través del Cold Plate.

Puntualmente, los tres procesos en los que se enfatizó la investigación mencionada son conducción, convección y radiación, los procesos ocurren durante el balance de calor o energía en

un techo verde, sumándole el calor latente el cual para muchos tiene un rol fundamental y más cuando el suelo está húmedo.

Avanzando un poco en el razonamiento con relación a los diferentes autores que han realizado validaciones de los modelos de transferencia de calor, existe una estrecha relación con lo propuesto por Kreith (1970) quien define la termodinámica como, “la ciencia que trata la relación entre el calor y otras formas de energía”. Según esto, se estaría hablando de la ciencia base para poder estudiar cualquier sistema en donde exista un gradiente de temperatura o la combinación de dos sistemas los cuales se encuentren a diferentes temperaturas. Pues, en cualquiera de estos escenarios existe transferencia de energía y el proceso asociado a este transporte de energía se le conoce como proceso de transferencia de calor.

Todos los procesos de transferencia de calor cumplen las dos leyes principales de la termodinámica, pues consideran el cambio de la energía y no su creación o destrucción respetando la primera ley. Cómo también respetan la idea comprobada experimentalmente, de que no es posible un proceso donde la transferencia de calor neta se comporta únicamente de una zona de temperatura mayor a una de temperatura menor, o en otras palabras la segunda ley de la termodinámica (Kreith et al., 2011).

De esta manera, se suele pensar que, al cumplir con estas dos leyes, los principios de transferencia de calor se derivan de las leyes básicas de la termodinámica. Pero esto, es un error, pues la termodinámica clásica según Kreith (1970), realiza un análisis termodinámico donde describe el estado de un sistema de modo general y no analiza en detalle el proceso por lo que se limita al estudio de estados de equilibrio, incluyendo equilibrio mecánico, químico y térmico. Por lo que el flujo de calor y otros conceptos teóricos como la transferencia de masa y difusión deben ser analizados con otro tratamiento cuantitativo. Dónde, para el caso del flujo de calor, se debe

considerar la falta de equilibrio en las temperaturas. Por lo tanto, se pasa a considerar la transferencia de calor desde el punto de vista de ingeniería, con el fin de determinar la rapidez de transferencia de calor a una diferencia de temperatura especificada. Esto con objetivos cada vez más asociados al desarrollo óptimo de un sistema desde puntos de vista cómo, costos, factibilidad o eficiencia (Kreith, 1970).

Por otra parte, en diversos problemas de ingeniería identificados, los tres tipos de transferencia de calor (Radiación, Convección y Conducción) se encuentran relacionados entre sí, por lo que una solución común para tales problemas puede simplificarse usando para los tipos de transferencia de calor, una conductancia o resistencia térmica, con el fin de analizar sistemas térmicos en el que ocurren varios tipos de transferencia de calor simultáneamente; ya sea través de secciones conectadas en serie o mecanismos en paralelo, como suele ocurrir para la transferencia de calor para una sección definida de un sistema a nivel práctico Kreith (1970).

Por último, se considera la resistencia térmica para los tipos de transferencia de calor como la resistencia térmica que una capa ya sea de un material específico o de un fluido opone al tipo de flujo de calor. Además, se define la conductancia como el recíproco de la resistencia para todos los tipos de transferencia de calor o la facilidad que un material o fluido ofrece para que exista flujo de calor.

Continuando con los procesos involucrados en la transferencia de calor, Tabares Velasco (2009) incluyó otro término el cual tiene que ver con la transferencia de calor por radiación y que representa la diferencia entre la radiación de entrada y salida a la superficie de la CV. Este consiste en la suma de: radiación de onda-corta o radiación solar (directa y difusa) R_n , solar y la radiación de onda-larga o radiación infrarroja de los alrededores R_n , IR.

$$R_n = (R_{n,solar}) + (R_{n,IR}) \quad (\text{Ecuación 4})$$

La radiación neta para una hoja puede ser expresada a través de la siguiente ecuación la cual fue propuesta por Jones (1992) & Nobel (1983):

$$R_n = R_{sh} * (1 + \alpha_{soil})(1 - \alpha_{leaf}) + (\sigma T_{sky}^4 + \sigma \epsilon_{soil} T_{substrate}^4 - 2\sigma \epsilon_{leaf} T_{leaf}^4) \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

R_{sh} = La radiación solar o de onda corta en la superficie, [W/m²]

α_{soil} = Albedo o reflectividad del suelo

α_{leaf} = Albedo o reflectividad de las hojas

ϵ_{soil} = Emisividad del suelo

ϵ_{leaf} = Emisividad de las hojas

T_{sky} = Temperatura del cielo, K

$T_{top,substrate}$ = Temperatura del substrato, K

T_{sky} = Temperatura de las hojas, K

σ = Constante de Stefan-Boltzmann, 5.64×10^{-8} W/m²K⁴

Un factor importante es el coeficiente de extinción el cual se relaciona con la Ley de Beer para determinar la radiación neta. Esta Ley se aplica a los dos tipos de radiación, pero se debe considerar que las hojas de acuerdo con su tipo poseen diferentes coeficientes de extinción.

Otro importante ítem en la incidencia de la transferencia de calor de una cubierta verde es el balance de energía el cual fue generalizado por Jones (1992) a través de la siguiente ecuación:

$$R_n = ET + Q_{conduction} + Q_{sensible} + S_{thermal} + M \text{ (Ecuación 6)}$$

Donde,

R_n = flujo radiactivo neto [W/m^2]

ET = Evapotranspiración, o flujo de calor latente por convección, [W/m^2] (Flujo de calor latente por convección, representa la evaporación del suelo y la pérdida de agua por transpiración de la planta)

$Q_{sensible}$ = Flujo de calor sensible por convección, [W/m^2] (Flujo de calor entre el techo y el aire circundante)

$Q_{conduction}$ = Flujo de calor conductivo a través del techo, [W/m^2] (Representa la transferencia de calor a través del techo)

$S_{thermal}$ = Almacenamiento térmico para el sustrato, las plantas, [W/m^2] (Es la capacidad de almacenamiento de las plantas, es despreciada porque es pequeña en comparación con la capacidad de almacenamiento térmico de la capa de suelo o como en el caso de este estudio por considerar un estado casi estacionario en la transferencia de calor)

M = Almacenamiento metabólico (fotosíntesis y respiración), [W/m^2] (También se desprecia pues solamente representa alrededor del 1-2% de la radiación neta)

Esta ecuación de balance de energía es aplicable, ya sea a todo el techo verde (Gaffin et al., 2005) o por separado a las plantas, el aire alrededor de las mismas, y el sustrato o también, a la separación de las plantas y el sustrato Best (1998) & Herbes et al. (2008)

Conviene hacer la salvedad que, modelos anteriores han realizado un balance de energía calculando la radiación neta usando la Ley de Beer junto con unos coeficientes de extinción para las transmisiones de onda larga y onda corta tal como se muestra a continuación:

$$R_n = R_{sh} * (1 + \alpha_{soil})(1 - \alpha_{leaf})(1 - \tau_{solar}) + (\sigma T_{sky}^4 + \sigma \epsilon_{soil} T_{soil}^4 - 2\sigma \epsilon_{leaf} T_{leaf}^4)(1 - \tau_{IR}) \text{ (Ecuación 7)}$$

Donde,

$$\tau_{solar} = e^{-K_s LAI}, \text{ transmisión de onda corta de un dosel}$$

K_s = coeficiente de extinción

$$\tau_{IR} = e^{-K_s LAI}, \text{ transmisión de onda larga de un dosel}$$

LAI = Índice de área foliar [(área de la hoja)/(superficie del suelo)]

Gracias a dichos cálculos, se encontró que las hojas horizontales y cónicas poseen los coeficientes de extinción más largos (ideales). Esto quiere decir que la sombra es mayor, lo que se traduce en una menor transmisividad.

Otro factor que requiere tomarse en cuenta es la transferencia de calor convectivo o sensible, que corresponde a aquel calor que se transporta al aire de la capa vegetal o sustrato, el cual calienta o enfría el aire por medio de convección la cual puede ser calculada como una resistencia o un coeficiente de transferencia de calor general como se muestra a continuación.

$$Q_{sensible} = \frac{\rho C_p}{(r_{a,heat})} (T_{so} - T_{air}) = \rho C_p h_{heat} (T_{so} - T_{air}) = h_{convection} (T_{so} - T_{air}) \text{ (Ecuación 8)}$$

Donde,

r_a = Resistencia aerodinámica, s/m

$h_{convection}$ = Coeficiente de transferencia de calor convectivo, [W/m²C]

h_{heat} = Conductividad de transferencia de calor, m/s

En cuanto a la resistencia de la capa límite puede estimarse simplemente suponiendo que las hojas son isotérmicas y tienen forma de placas planas, cilindros o esferas con convección forzada laminar tal como lo propuso Jones (1992).

En cuanto al r_a abreviado, se llega a la siguiente fórmula, la cual corresponde al coeficiente de transferencia de calor convectivo equivalente (Allen et al., 1998):

$$h_{ra} = 5.6u \frac{W}{m^2 * K} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Resaltando que, hay una ventaja al hallar la resistencia aerodinámica pues, a diferencia de la correlación de Nusselt-Reynolds, no requiere características de longitud, pero no coincide con el comportamiento de una CV, ya que se asume para ese caso una superficie uniforme, extensiva y horizontal con una turbulencia generada por esfuerzo cortante en la superficie y no por obstrucciones a favor del viento, lo que no corresponde en el caso de una CV.

Las cubiertas deben considerar o depender respecto a la transferencia en esta sección, en la velocidad del viento y características de longitud, (Incropera & Dewitt, 2002).

$$h_{turb} = 5.82 * L^{0.2} * u^{4/5} \frac{W}{m^2 * K} \quad (\text{Ecuación 10})$$

$$h_{lam} = 3.84 * L^{0.5} * u^{1/2} \frac{W}{m^2 * K} \quad (\text{Ecuación 11})$$

La ecuación 11 calcula la transferencia para un grupo de hojas con un factor multiplicativo Beta que se encuentra en rangos de 1.4 a 2.5 para convección forzada. Una cubierta verde usa una ecuación similar a la 10 para velocidades de viento mayores a 1.75 m/s.

Otro de los conceptos que involucra los modelos de transferencia de calor y de masa es la evapotranspiración o transferencia de calor latente la cual consiste en el proceso de pérdida de agua del sustrato o de las plantas. Por otra parte, este fenómeno ocurre cuando hay un diferencial de presión de vapor o VPD entre las plantas y el aire circundante. Este VPD hace que el vapor de agua se transfiera de la superficie de la hoja de la planta o del sustrato al aire ya sea por difusión o convección. El VPD maneja el proceso y debe existir la relación: el VPD en el aire circundante debe ser menor que el interno de la planta para que ocurra el fenómeno en discusión.

Los parámetros que afectan la evapotranspiración son: radiación solar, temperatura del aire, humedad del aire y velocidad del viento, pero existen factores relacionados con el tipo de planta y WWC del sustrato (Allen et al., 1998; Hillel, 1998). Se adicionó Resistencia aerodinámica y de superficie a la transferencia de calor y masa para calcular la ET (Hillel, 1998)

$$ET = \frac{\rho C_p}{\gamma(r_s + r_a)} (e_{so} - e_{air}) \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde,

e_{so} = Presión de vapor del aire en contacto con la superficie, [kPa]

r_s = Resistencia estomatal a la transferencia de masa, [s/m]

r_a = Resistencia aerodinámica a la transferencia de masa, [s/m]

γ = Constante psicométrico = $C_p P / 0.622 i_{fg}$, [kPa/°C]

i_{fg} = Entalpía de la vaporización, kJ/kg

P = Presión atmosférica, kPa.

La ecuación anterior se puede asumir que combina todas las resistencias cuando el suelo o sustrato está completamente cubierto por las plantas. En este caso, combinaría las resistencias a la masa y a la transferencia de calor del suelo, las resistencias internas de las plantas y el suelo y las hojas de la capa límite en dos resistencias principales en serie (Allen et al., 1998).

Otra forma de medir y calcular la evapotranspiración es por el ratio o tasa de Bowen, el cual se define como la relación de transporte de calor sensible y del calor latente Hillel (1998) tal como se presenta a continuación:

$$\beta = \frac{Q_{sensible}}{ET} \approx \gamma \frac{\Delta e}{\Delta T} \quad (\text{Ecuación 13})$$

Este ratio o tasa de Bowen depende de la interacción entre los fenómenos, transporte de calor y masa (Hillel, 1998). Y luego, al conocer estos valores, se calcula con la fórmula:

$$ET = \frac{Q_{sensible}}{\beta} = \frac{h_{convection}(\Delta T)}{\beta} \quad (\text{Ecuación 14})$$

Sin embargo, hacer el respectivo cálculo por cualquiera de las ecuaciones extraídas de otras investigaciones es viable, aunque la ecuación 12 requiere de conocimientos de presión de vapor en el aire en contacto con una superficie y su temperatura.

A continuación, Rezaei (2005) obtuvo valores de evapotranspiración alrededor de 350W/m² durante el pico de radiación solar cuando el sustrato se encontraba más mojado durante todo el experimento. El estudio demostró que no solo la evapotranspiración reduce las cargas térmicas, sino que también la reducción de los flujos de calor son los mayores durante los picos de radiación.

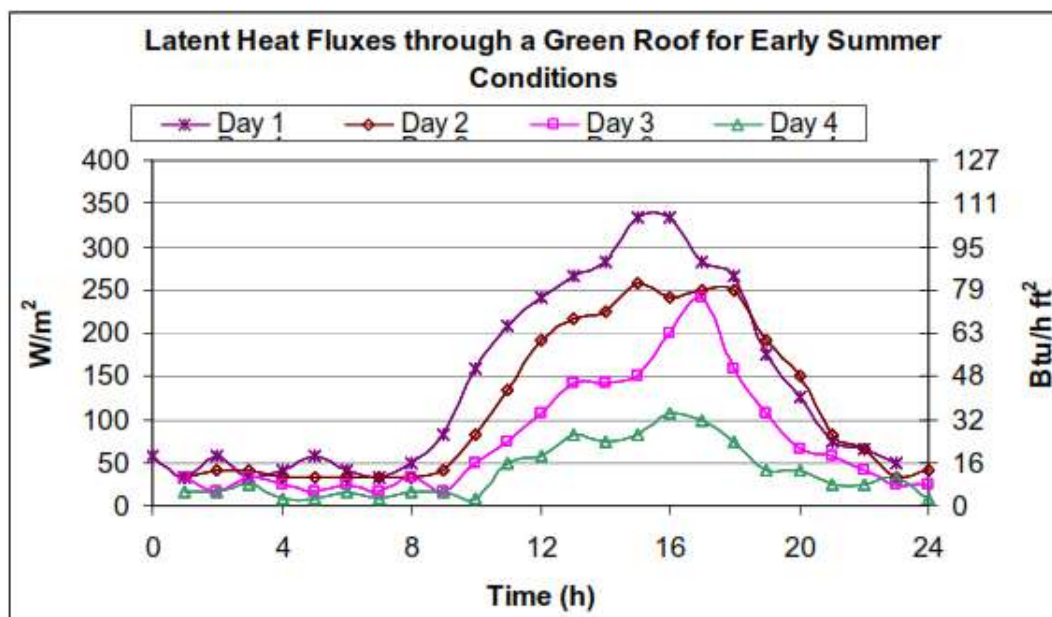


Ilustración 3 – Tasa de evapotranspiración para las condiciones de principios de verano en Pennsylvania

Fuente: (Rezaei, 2005)

Existen diversos modelos los cuales han despreciado procesos como la evapotranspiración o la perdida y ganancia de agua en el sustrato o el VWC. De este modo subestiman el comportamiento de un techo verde mojado y lo cual simplifica los balances de calor y masa. Entre estos modelos, Nichau et al. (2001), en el cual se demuestra como un techo verde tiene mejor comportamiento térmico (aislamiento térmico) en comparación con las envolventes de otros techos (con y sin aislamiento térmico). Por otra parte, Wong et al. (2003) propone que, un sustrato seco almacena menor energía que uno mojado. Este modelo subestima el comportamiento del agua en el sustrato y no hace el análisis correcto a un suelo húmedo despreciando el efecto de la evapotranspiración cuando el suelo está mojado lo que puede afectar la ganancia de calor.

Además, hay que tener en cuenta que la velocidad del viento según Tabares (2009) también afecta la evapotranspiración y por lo tanto a flujo de calor convectivo, donde se evidencia una

relación inversa entre estos dos fenómenos. Ya que al incremento de la velocidad del viento mejora el transporte de calor y de vapor, por lo que este genera un incremento en los flujos de evapotranspiración y por lo tanto una disminución en los flujos de calor involucrados en el balance de energía (convectivo y conductivo), reduciendo en estos el calor ganado o adquirido por la radiación neta.

Theodosiou (2003) & Kumar and Kaushik (2005), coinciden con la importancia del índice de área foliar (LAI) en el flujo de calor al estar involucrado en la transferencia de calor convectivo, el sombreado (coef de extinción y transmisividad) y la evapotranspiración.

Estos 3 modelos son la validación de Palomo Del Barrio (1998), el cual fue el único dónde se tuvo en cuenta el contenido de agua en el sustrato, hallando menores flujos de calor a través del techo cuando la cubierta verde estaba mojada, comparado con uno seco. Se le atribuye este fenómeno a la disminución general en la difusividad térmica y a la pérdida del protagonismo del fenómeno evapotranspiración.

De la misma forma, Sailor (2008) detallo los potenciales beneficios de una cubierta verde a través del balance de energía de una cubierta verde por medio del software Energy Plus. El modelo estudiado comprende diferentes conceptos para el análisis del balance de energía presente en la cubierta verde como lo son intercambio de radiación de onda larga y onda corta, los efectos de la transferencia de calor convectiva, la evapotranspiración desde el suelo hacia las plantas, la conducción y almacenamiento de calor en la capa del suelo y diferentes propiedades térmicas las cuales se relacionan de manera directa con el factor de humedad.

Dicha formulación fue basada principalmente en el FASST (Fast All-season Soil Strength) propuesto por Frankenstein (2004). El objetivo para Sailor fue el cálculo de la temperatura de la

superficie del suelo (T_g) y del follaje o las plantas (T_f) en cada instante de tiempo. Para el modelo de la energía de la cubierta verde fue usado el Software EnergyPlus debido a que es la plataforma más avanzada hasta la fecha. El software requiere unas características dadas por el usuario como cargas internas, horarios y climas. Además, está basado en programas como el BLAST y DO2-2. EnergyPlus tiene como características principales: datos de estaciones meteorológicas en formato de texto, solución simultánea de los balances térmicos, internos, externos y de las cargas, conducción transitoria del calor a través de los elementos del edificio, modelo de confort térmico, ajuste de iluminación natural, entre otros más.

Por su parte, Sailor (2008) menciona que las características más importantes para la vegetación referentes a la transferencia de calor corresponden al índice de área foliar (LAI), fracción de la cobertura vegetal, el albedo y la resistencia estomatal. Estos valores de LAI varían de 0.5-5 (Sailor, 2008) y son representaciones de la cobertura vegetal de la cubierta verde en hojas. El albedo es la reflectividad de la superficie a la energía solar que incide directamente y por último la resistencia estomatal es un parámetro que rige la tasa de transpiración de la planta a través de los estomas de sus hojas.

Igualmente, el análisis del balance energético desarrollado en EnergyPlus tiene en cuenta la influencia de la radiación solar en la cubierta a través del calor sensible (convección) y latente del suelo (evaporación) de las superficies de las plantas junto con la conducción de calor hacia el sustrato de suelo y la radiación de onda larga desde y hacia las superficies del suelo y de las hojas (Sailor, 2008). Este modelo sigue el mismo de FASST desarrollado por Frankenstein.

El objetivo del modelo FASST buscó determinar la capacidad del suelo para el paso de vehículos con y sin pasajeros y para hallar esto incluyó el balance de energía y humedad dentro de un sueño con vegetación. Sailor implementó el mismo modelo con pequeñas modificaciones en un

suelo de capa fina. El balance de energía es dividido para la capa del follaje y uno para la superficie del sueño (Ff y Fg por sus siglas en inglés), por lo tanto, se obtienen dos ecuaciones que relacionan las temperaturas del follaje y de la superficie del suelo como lo son:

$$F_f = \sigma_f [I_s^\downarrow (1 - \sigma_f) + \varepsilon_f I_s^\downarrow - \varepsilon_f \sigma T_f^4] + \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_f + L_f \quad (\text{Ecuación 15})$$

$$F_g = (1 - \sigma_f) [I_s^\downarrow (1 - \sigma_g) + \varepsilon_g I_{ir}^\downarrow - \varepsilon_g T_g^4] + \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_g + L_g + K * \frac{\partial T_g}{\partial z} \quad (\text{Ecuación 16})$$

Donde σ_f es la cobertura de la fracción vegetal, I_s^\downarrow es la radiación de onda corta, ε_f es la emisividad del follaje, T_f es la temperatura del follaje en Kelvin, H_f es el flujo de calor sensible en el follaje y L_f es el flujo de calor latente para el follaje; todos estos términos son para el balance de energía del follaje dado en la ecuación 15. Mientras que para el caso del balance de energía en el suelo (Fg) solo se adhiere los dos últimos términos de K y $\frac{\partial T_g}{\partial z}$ que representan la conductividad térmica y el gradiente de temperatura respecto del sustrato, respectivamente.

Este autor además menciona que gracias a mediciones de laboratorio anteriores encontraron la conducción del calor a través de las capas se complica debido a la variación de las propiedades térmicas del suelo como albedo, conductividad térmica, capacidad térmica específica y densidad en respuesta al contenido de humedad de este.

En adición, este investigador presenta una linearización de las ecuaciones planteadas para la obtención de los balances de energía descritos en las ecuaciones 15 y 16, con el fin de obtener de manera simultánea la temperatura del sustrato T_g y de la vegetación T_f y para esto invierten las ecuaciones de conducción (CTF) dentro del software en el que se desarrolló el balance (EnergyPlus), pues al hacer esto obtienen un modelamiento de la conducción transitoria a través de cualquier material.

La perspectiva global relaciona el calor de una superficie de un elemento constructivo con historias finitas de temperatura en ambas capas. Sin embargo, el método aplicado por Sailor a través de EnergyPlus citan que sigue en desarrollo por parte de los desarrolladores del software por lo que puede generar pequeñas impresiones. Las ecuaciones ingresadas en el programa y a la vez adaptadas por (Sailor, 2008) son:

$$C_{1,f} + C_{2,f}T_g + C_{3,f}T_f = 0 \quad (\text{Ecuación 17})$$

$$C_{1,g} + C_{2,g}T_g + C_{3,g}T_f = 0 \quad (\text{Ecuación 18})$$

Con la adaptación del modelo de Sailor se obtuvo que los resultados siempre están ligados a las características de las capas de la cubierta, por ejemplo, en el caso de contar con un mayor espesor de sustrato se genera mayor aislamiento, y generando una mayor disminución de temperatura con un mayor ahorro energético al interior del edificio, y en el caso de contar con mayor densidad de vegetación produce una mayor reducción del consumo de energía en invierno.

Asimismo, se destacó que este modelo implementado y adaptado por Sailor a través de otros existentes generó un sesgo de 2.98°C en los resultados de las temperaturas del suelo simuladas tal como se observa en la siguiente gráfica de este mismo autor:

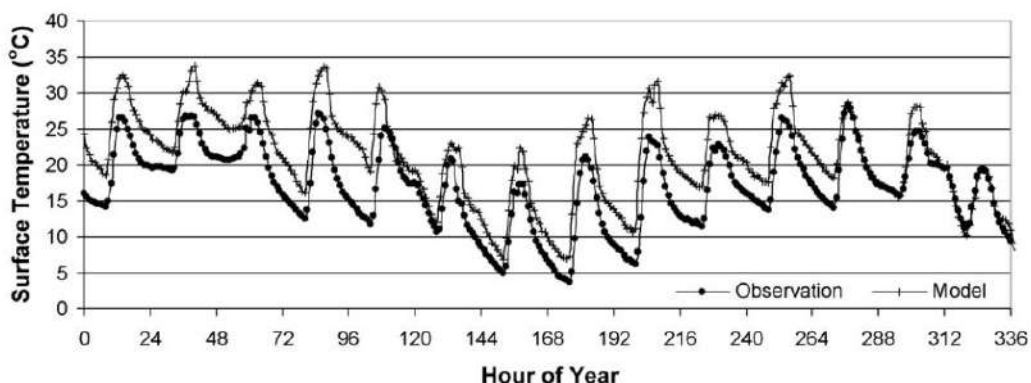


Ilustración 4 - Resultados temperaturas del suelo simuladas vs registradas

Fuente: (Sailor, 2008)

A pesar de obtener sesgos menores a 3°C entre las observaciones y el modelo, Sailor destaca que este modelo no cumple criterios para validación debido a la ausencia de entradas necesarias como el índice de área foliar LAI y las resistencias estomáticas que permitirían la reducción en dichos sesgos de error. Más bien, la cercanía entre la adaptabilidad del modelo a las fluctuaciones diurnas y estaciones logra que se proporcione una confiabilidad de que los valores producto de la simulación estén dentro de rangos aceptables.

Enfocándose en otros aspectos, Konkov (2018) desarrolló y aplicó un modelo de cubierta verde avanzado a través de los ya existentes y en especial se basan en el modelo FASST de resistencia de suelo desarrollado por Frankenstein y el modelo de calor-aire-humedad llamado HAMFit-Gr.

En adición a las características que indican en el balance, Konkov, de la misma manera que Sailor, cita que la cubierta se ve afectada por la radiación solar de onda corta, la radiación de onda larga entrante y saliente y la reflexión multiplicada entre las hojas y el medio de cultivo y en consecuencia destaca que la parte de la radiación que ingresa al sistema depende del índice de cobertura vegetal que describe mediante una proporción de superficie de cubierta y el correspondiente índice de superficie foliar (LAI). Un esquema que permite ilustrar lo antes mencionado y planteado por el mismo investigador es el siguiente:

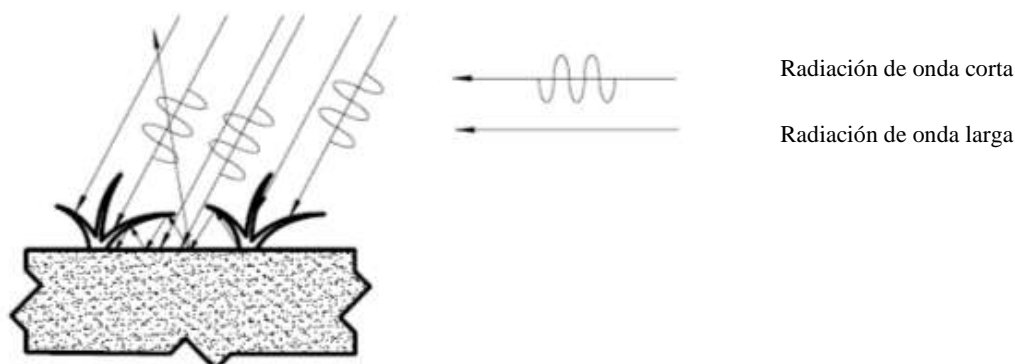


Ilustración 5 - Intercambio de calor por radiación en un tejado verde

Fuente: (Konkov, 2018)

Sumado a esto, describe que la suma de la radiación solar directa y la radiación que transmite las hojas de la cubierta componen el balance energético de la radiación de onda corta de la parte superior de la capa de cultivo de la cubierta vegetal (Konkov, 2018).

En el caso de la radiación de onda larga este autor lo describe como la suma del intercambio de radiación térmica del cielo y la radiación emitida por las capas de la planta y del medio del cultivo al igual que Yaghoobian et al. (2015) y del mismo modo estos últimos expresan que una cubierta verde completamente poblada recibe un 80% menos de radiación de onda corta que aquella que posee una baja densidad de vegetación. Sin embargo, esto puede ser contraproducente debido a que un alto índice de cobertura vegetal y área foliar podría limitar la radiación saliente de los medios de vegetación hacia el cielo (Gargari et al., 2016)

Igualmente, el rendimiento térmico general se ve afectado por el movimiento de aire que se presenta en toda la estructura de la cubierta verde y a su vez por la transferencia de calor por convección. El cálculo de dicho flujo requiere del número de Nusselt, Grashof y Reynolds (Tabares-Velasco & Srebric, 2011).

Otro proceso mencionado por Konkov es la evapotranspiración, que depende de factores como características del dosel (altura, área foliar, densidad foliar), factores meteorológicos (velocidad del viento, temperatura, presión, radiación solar) y la cantidad de agua en la zona de las raíces. Este factor, a su vez, es impulsado por la radiación solar, la velocidad del viento y las diferencias de presión de vapor. Conjuntamente, se cita que la modelización del proceso de evapotranspiración sigue siendo compleja en la actualidad, por lo que por medio de diferentes modelos se han desarrollado supuestos para el cálculo de este.

Uno de estos modelos contempla la manera menos completa para el cálculo y es por medio del déficit de presión de vapor tal como lo hace Tabares-Velasco & Sebric. Conviene mencionar que para la obtención precisa de la simulación de la transferencia de calor en cubiertas vegetales es requerido la evapotranspiración real de las mismas y esta varía en relación con la cantidad de humedad del suelo, por tanto, se menciona que en el caso de que el suelo esté completamente saturado de agua la evapotranspiración real será igual a la potencial, mientras que en el caso de poca disponibilidad de agua esta misma tasa disminuye.

En el estudio referenciado, se cita que los factores ambientales que se ven afectados por las plantas son el intercambio de radiación de onda corta y larga, temperatura, viento y precipitación, de tal modo que estos provoquen un paso del calor y la humedad en el medio de crecimiento. A lo anterior se adiciona que en el balance hídrico se divide en tres etapas: no saturado cuando los poros del sustrato no están llenos de agua, saturado en el momento que el 100% de la porosidad del medio de crecimiento esté llena de agua y sobresaturado cuando aparte de que los poros estén 100% saturados, se observe como la cubierta ya no podría retener o absorber el agua (Konkov, 2018) y, esta última se presenta cuando el agua entrante excede la capacidad de drenaje de la cubierta ajardinada generando un flujo de escorrentía que a la vez podría transportar el calor por toda la vegetación.

Sailor (2008) menciona al igual que Konkov (2018) destacan que las transferencias térmicas del suelo varían de manera directa y lineal con el contenido volumétrico de agua o VWC y que este último se puede describir por medio de la suma de la precipitación, el riego, la evapotranspiración y el agua de escorrentía.

En el estudio referido, solamente tiene en cuenta el contenido de humedad general en el sustrato y no dependientes por a diferentes profundidades de este como debería plantearse, mientras que

para el caso de las temperaturas si se presentan discretizadas a través de la altura del medio de crecimiento de las plantas como se muestra a continuación:

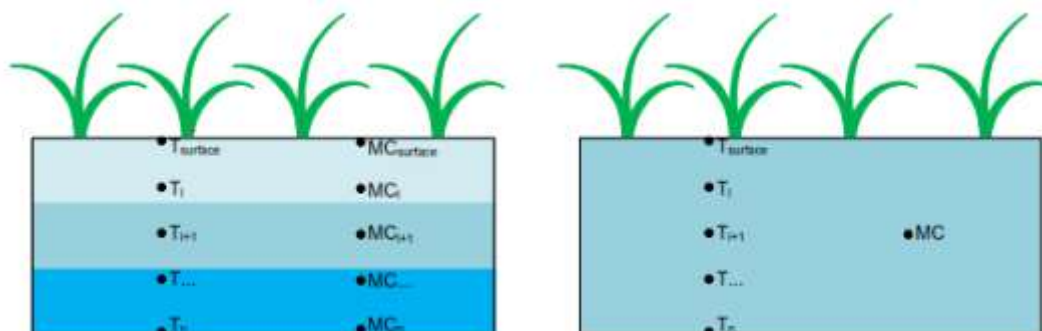


Ilustración 6 – Discretización de una cubierta verde

Fuente: (Konkov, 2018)

En la sección de la derecha se representan los parámetros que tuvo en cuenta Konkov (2018) para el desarrollo del modelo, mientras que en la izquierda se presentan todos aquellos que de manera adicional deberían tomarse a la hora de realizar el balance de energía.

Entrando en detalle en el objetivo principal de Dmitrii Konkov, consistió en el desarrollo de un modelo de cubierta verde completo que simule los procesos de movimientos de calor y humedad presentados en una cubierta ajardinada. Además, citó que la formulación del modelo tendría en cuenta procesos en la cubierta verde como lo son el rendimiento energético, la retención de agua, generalización del contenido de humedad tal como se presentó en la **ilustración 6**, el detalle o la exactitud en la evapotranspiración y la radiación exterior y por último el flujo de agua y vapor en el sustrato junto con la energía en este.

Al igual que Sailor, este autor también se basó en la revisión del modelo FASST desarrollando el modelo con consideraciones en propiedades térmicas y de humedad de los materiales que componen el techo verde, la transferencia de vapor de humedad de vapor y la escorrentía; aunado

a una comparación de estudio desarrollada en paralelo en el Centro de Excelencia en Ciencias de la Construcción del Instituto Tecnológico de la Columbia Británica. Dicho modelamiento tuvo variaciones en los espesores de aislamientos, medios de cultivos como también en las propiedades de la vegetación en diferentes climas y estaciones.

En el estudio citado, se destacan que los principales factores que influyen en el desempeño de un modelo de transferencia de calor y humedad es el sombreado de las hojas, aislamiento, evapotranspiración, masa térmica, convección, radiación de onda corta y larga, conducción y el flujo de calor. Una figura hecha por Konkov refleja los principales procesos presentes antes mencionados tanto en la cubierta verde como en los diferentes materiales que la componen y es la siguiente:

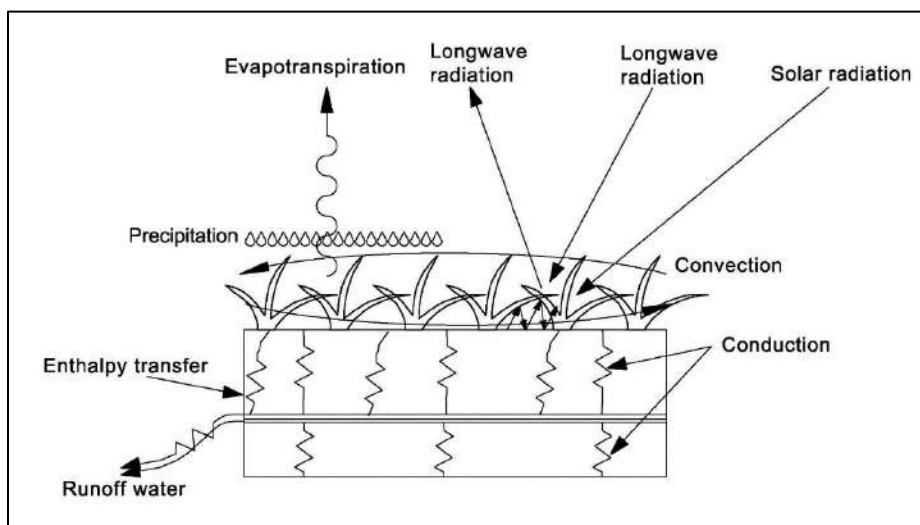


Ilustración 7 - Puntos de calor y humedad en la cubierta vegetal

Fuente: (Konkov, 2018)

El HAMFit-GR desarrollado por Konkov pretende calcular la temperatura del follaje (T_f) y las condiciones ambientales para el modelo de calor y humedad el cual compete de manera directa con la transferencia de calor y la humedad dentro de la estructura de la cubierta verde y también

determinar la temperatura del suelo (T_g) la cual es incluida en el modelo vegetativo que tomó de base este autor. Se debe destacar que el modelo de vegetación como su palabra lo explica es solo para las plantas mientras que el de calor y humedad es simulado únicamente para las capas de composición de la cubierta verde. Dicho modelo del techo verde fue desarrollado por Dmitrii por medio del software “COMSOL Multiphysics”.

En el caso de los flujos de calor por radiación, estos fueron calculados por el método de los dos planos paralelos semi-finitos con el supuesto de que existe una única capa homogénea de vegetación. Dentro de este proceso, el autor comenta que la tasa de cobertura fraccional es aquella que impide el paso de la radiación hasta el medio del cultivo y es calculado en función de las estaciones y propiedades de las plantas.

El modelo HAMFit-GR divide los cálculos de los flujos de calor convectivos o sensibles tanto para las superficies del suelo como para la de las plantas. En este proceso, es tenido en cuenta las temperaturas del follaje, del suelo, del aire por encima y debajo de la vegetación al igual que los coeficientes de transferencia de calor por convección. Esta última temperatura que circunda por encima y por debajo de la vegetación es determinada a partir de la temperatura ambiente del aire, de la superficie del suelo y del follaje y plantea que es usada la relación empírica propuesta por Dearforff (1978).

Otro apartado para el planteamiento del balance de energía es el calor latente y es de entrar en detalle debido a la excesiva humedad presentada en el medio de cultivo y la transferencia de esta misma hacia o desde el entorno. La determinación del calor latente también requiere de la mezcla del aire entre la superficie del suelo y las plantas el cual es adaptado del modelo FASST, la humedad del suelo que es asumida como 1 en caso de lluvia, la humedad de la superficie del follaje determinada por medio de la resistencia atmosférica y de las plantas a la difusión del vapor;

seguido se debe anexar que también se incluye la velocidad del viento al igual que en el cálculo del calor sensible y la resistencia estomática en función de las propiedades de las plantas.

El último proceso antes de definir las ecuaciones del balance térmico en la capa del follaje y en la superficie de la vegetación es el movimiento del agua el cual es considerado en el modelo propuesto y denominado como HAMFit-GR por medio del efecto de la lluvia tanto en la transferencia de energía como en la de humedad. Cuando hay precipitación en la zona de la cubierta, una parte es absorbida o interceptada por las plantas mientras que la otra retorna a la atmósfera o gotea al suelo y termina drenando. En caso de ser mínima la precipitación, solo se produce evaporación y toda esta retorna a la atmósfera, pero en cambio de contar con valores altos de lluvia, aquel exceso que no es captado se evacua por el sistema de drenaje.

El movimiento de agua tiene en cuenta la cantidad de lluvia entrante para realizar el cálculo de aquella precipitación que es interceptada por las hojas y la que satura el sustrato, el índice de área de vapor que está entre 0,5 y 2 (Konkov, 2018), la densidad del agua, capacidad calorífica y la temperatura del agua lluvia. Por su parte, el balance de agua en el sustrato toma a consideración el agua transpirada por las plantas a la atmósfera generando un flujo de masa desde el mismo sustrato. Esta cantidad de agua que es evacuada de las plantas se estima a través del modelo de calor y humedad que tiene en cuenta la presión de vapor basado en la relación de mezcla are-follaje.

Otro proceso interno del movimiento de agua es la cantidad de agua que ingresa al sustrato y la cual fluye a través del sustrato hacia la capa drenante donde se debe estimar el tiempo que tarda en desplazarse esa gota de agua al igual que la ubicación o coordenada a lo largo del tejado.

Todos estos procesos anteriores descritos en el modelo HAMFit-GR de Dmitrii, son necesarios para el cálculo de las ecuaciones generales en el balance térmico del follaje y en la superficie del medio de crecimiento como se muestran a continuación:

$$\begin{aligned} \sigma_f [I_f(1 - \sigma_f) + \varepsilon_f I_w - \varepsilon_f \sigma T_f^4 + \gamma_p C_p T_p Intp] + \frac{\sigma_f \varepsilon_f \varepsilon_g \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) \\ + (e_o + 1.1LAI\rho_{af}C_{p,a}C_fW_{af})(T_{af} - T_f) + LAI\rho_{af}C_f lW_{af}r_t(q_{af} - q_{fsat}) = 0 \end{aligned}$$

(Ecuación 19)

$$\begin{aligned} (1 - \sigma_f)[I_s(1 - \alpha_g) + \varepsilon_g I_w - \varepsilon_g \sigma T_g^4] + \frac{\sigma_f \varepsilon_f \varepsilon_g \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + (e_o + \rho_{ag}C_{p,a}C_h^g W_{af})(T_{af} - \\ T_f) + C_e^g lW_{af}\rho_{ag}(q_{af} - q_g) + \gamma_p c_p T_p (Prc - Intp + D) + k \frac{\partial T_g}{\partial z} - \partial c_p T_g = 0 \end{aligned}$$

(Ecuación 20)

Una vez el autor definió las ecuaciones generales para el balance de energía procedió a definir aquellas entradas que permitieran un correcto modelamiento del movimiento de calor y humedad a través de la cubierta verde. Estas variables de ingreso son temperaturas interior y exterior del aire y ambiente, humedades relativas, radiación sola, velocidad del viento y cantidad de lluvia por el lado de condiciones exteriores en interiores. Por el lado de las propiedades del suelo, es necesario definir previamente el albedo y la emisividad, la densidad y la capacidad calorífica, la conductividad térmica, líquida y de vapor, el porcentaje de humedad del suelo y la capacidad de almacenamiento de la humedad como última característica para el medio de crecimiento o sustrato.

Otros de los conceptos fundamentales en las correcciones físicas del modelo de cubierta verde desarrollado por Konkov, consistió en la determinación o caracterización del medio de cultivo, la capa drenaje y las características de la vegetación. Para el caso de los parámetros del sustrato, Konkov realizó diferentes ensayos, uno de ellos fue de acuerdo con el método especificado en la

norma ASTM D7263 – 09 para el cálculo la densidad y porosidad cumpliendo con todos los criterios planteados en dicha norma. En el caso de la proporción de absorción y capacidad de almacenamiento de los medios de cultivo en función de la humedad, esta fue determinada por medio del cálculo de muestras de suelo a través de una cámara ambiental.

Siguiendo con las propiedades de entrada, se halla que la conductividad hidráulica del suelo saturada se usa un equipo llamado “Infiltrometer” el cual determinada esta variable con una prueba, pero solo es realizada para la muestra completamente saturada. Como últimas propiedades y variables de entradas en el modelo se encuentra la conductividad térmica junto a la capacidad calorífica las cuales las determinó este autor a través del ensayo regido por la norma ASTM D5334 – 14 con la ayuda de un equipo llamado “KD2-Pro” que permite registrar valores de conductividad térmica.

En el caso de los parámetros de visualización de la vegetación, son considerados como críticos por parte del autor. Para la determinación de estos, se hizo a través de imágenes del prototipo creado para estudio a través de fotografías en diferentes instantes de tiempo y junto a un código de Matlab se obtuvieron los valores que son presentados en el caso de Konkov como un anexo para el código. Por otro lado, Zhang et al. (1996), correlaciona la temperatura de la superficie del sustrato con el tamaño del índice de área foliar (LAI); entre ellos, si la planta tiene muchas hojas, es decir, el índice de área foliar (LAI) es mayor, la temperatura del suelo disminuirá.

Otra referencia corresponde a Kumar & Kaushik (2005). Al determinar el impacto de los cambios en las características foliares, logró determinar la importancia del índice de área foliar (LAI) al encontrar la fluctuación de la temperatura en la interfaz al aumentar el LAI de 0,5 a 3,5, el suelo foliar del mantillo verde del orden de $11,6^{\circ}\text{C}$ se reduce a $3,6^{\circ}\text{C}$. Y a su vez, se logra una reducción del flujo penetrante de aproximadamente 4 W/m^2 .

Como últimos parámetros de entrada, se encuentran aquellos que son considerados como estándar para la baja vegetación el cual no necesitan ser medidos, por tanto, Konkov los presentan a modo de tabla resumen donde describe el nombre del parámetro, definición, unidad, valor mínimo y máximo de la siguiente manera a través de una recopilación de diferentes autores antes mencionados como Tabares-Velasco, Frankenstein y Koeing, Yaghoobian et al, entre otros más.

| # | Name | Definition | Unit | Min value | Max value |
|----|-------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------|-----------|
| 1 | zroot | Root depth | mm | 5 | 30 |
| 2 | a _{root} | Root fraction parameter a | m ⁻¹ | 5.558 | 10.739 |
| 3 | b _{root} | Root fraction parameter b | m ⁻¹ | 1.627 | 2.614 |
| 4 | rsmin | Minimal stomatal resistance | s/m | 120 | 900 |
| 5 | SAI | Stem Area Index | m ² /m ² | 0.5 | 6 |
| 6 | z _{0fm} | Roughness length | m | 0.02 | 0.02 |
| 7 | Sorption | Moisture content in soil | kg/m ³ | 400 | 600 |
| 8 | Conductivity | Conductivity | W/m ² K | 0.4 | 1.2 |
| 9 | V _{per} Permeability | Vapour Permeability | kg/Pam | 5.70E-11 | |
| 10 | Diffusivity | Water diffusivity | m ² /s | 3.6E-09 | 3.71E-06 |

Ilustración 8 - Parámetros de entrada provenientes de otras literaturas de modelos de transferencia de calor

Fuente: (Konkov, 2018)

Mientras que Sailor (2008) realizó validación por medio de un contraste de datos con los datos recopilados en el proyecto verde hecho en la Universidad Central de Florida, Konkov (2018) realizó un estudio de campo por medio del laboratorio de investigación del instituto de tecnología de British Columbia donde se recopilaron más de 15 meses en datos observando el rendimiento energético de un edificio de aproximadamente 250 pies².

El módulo creado para la toma de datos de contraste estaba compuesto por madera con 12 pulgadas de fibra de vidrio con un aislamiento especial llamado R 38 junto a las otras capas que componen una cubierta vegetal y una altura del sustrato de 10cm con especies de plantas *Sedum*.

Los sensores que usaron para los diferentes registros de las variables fueron: termocuplas para la temperatura, transductor para la humedad relativa, dispositivo Dragon GS1 para el contenido de humedad, piranómetro para la reflexión solar, transductor para los flujos de calor y una estación meteorológica para la precipitación y velocidad del viento.

El proceso de validación del modelo HAMFit-GR consistió en el contraste entre los datos registrados por medio de los equipos mencionados anteriormente y aquellos que fueron simulados o modelados por medio de las ecuaciones. En dicha validación, se realizó un paralelo tanto para el escenario sin vegetación como con vegetación, donde en el primer el cual contemplaba la temporada de sequía se obtuvo que, en las temperaturas se generó un error de sesgo medio de 2.06°C , humedades relativas modeladas desde los 0.4 hasta los 0.7 en la parte superior del cultivo, mientras que en el inferior varían desde 0.9 hasta 0.4.

En el caso del escenario de la temperatura en ausencia de vegetación en la parte superior, estas varían desde los 10°C hasta los 45°C y en todos los casos son valores próximos a los medidos por medio de los equipos, mientras que en el medio del sustrato sin vegetación tan solo se generó un rango desde los 15°C hasta los 35°C por máximo. Ahora bien, en el fondo del suelo se presentó un rango igual al del caso de las simulaciones en el medio de la capa de suelo.

Ahora bien, en los flujos de calor modelados estuvieron muy cercanos a los medidos con los equipos, sin embargo, al igual que en los casos anteriores de la humedad y temperatura, se generó una pequeña discrepancia que Konkov (2018) argumenta que se debe a la sombra de los equipos de medición. El flujo de calor puede alcanzar un rango de $20\text{-}25 \text{ W/m}^2$ durante el día tanto para la medición como los resultados producto de la simulación del modelo HAMFit-GR.

Por el contrario, en el suelo en ausencia de vegetación en temporada lluviosa, se obtuvo humedades relativas tanto simuladas como registradas que rodeaban el valor de 1 el cual es

equivalente al 100% tanto en la superficie del sustrato al igual que en la parte inferior, lo que conviene subrayar que el suelo permaneció húmedo durante esta época de lluvia.

Se debe agregar que los flujos de calor para este mismo escenario estuvieron presentes valores negativos, donde los rangos estaban desde los -10 W/m^2 hasta los 10 W/m^2 en el inferior del medio de crecimiento, mientras que en el techo tan solo alcanzaban valores desde -1.5 W/m^2 hasta, escasamente, los 0 W/m^2 .

En cuando a la validación del modelo con vegetación, en primer lugar Konkov (2018) analizó los registros y mediciones de la temperatura de las hojas encontrando rangos de $10\text{-}30^\circ\text{C}$, teniendo en cuenta que es el periodo sin precipitación. En relación con la humedad relativa, hubo aproximación entre los valores almacenados y simulados tanto en la superficie como en el inferior del medio de crecimiento donde los rangos iban desde $0,45$ a $0,55$ y de $0,5$ a $0,6$, respectivamente.

No obstante, las temperaturas también tuvieron cercanías entre sí, dando como resultado rangos desde los 15 hasta los 45°C para el follaje; también desde los 15°C pero sólo hasta los 35°C en el suelo destacando que este no llegó a rebasar los 40°C y por último las validaciones en la superficie, en el medio y en el inferior estaban comprendidos entre $15\text{-}35^\circ\text{C}$, $20\text{-}27.5^\circ\text{C}$ y $20^\circ\text{C}\text{-}25^\circ\text{C}$, respectivamente. En este escenario de la época de sequía para la cubierta vegetal, el autor identificó rangos de flujos de calor desde los -4 hasta los 4 W/m^2 en el sustrato, mientras que para el techo eran tan solo de -1 W/m^2 hasta 0 W/m^2 .

El último escenario de validación era la cubierta verde en época de lluvia, donde la humedad relativa en ambos casos (parte superior e inferior del sustrato) estuvo desde 0.95 hasta 1 o 100% . Sin embargo, las temperaturas iban desde los 10°C hasta los 20°C y en unos casos alcanzó los 25°C tanto en la vegetación como en la parte superior del medio de crecimiento.

Concluyendo el desarrollo y aplicación del avanzado modelo de cubierta verde realizado por Konkov (2018), se destaca que toda la simulación del HAMFit-GR es una combinación entre el Calor-Aire-Humedad como modelo base y a la vez toma en consideración la resistencia rápida del suelo en todas las estaciones. Además, menciona que la transferencia de calor y humedad se acoplan fácilmente al diseño del modelo debido a que es posible variar parámetros estructurales como el medio de crecimiento o las plantas.

Seguido, se cita que el modelo HAMFit-GR se valida por medio del contraste entre los datos de temperaturas medidos y calculados, flujos de calor y contenido de humedad en todo el sustrato. El análisis de sensibilidad hecho por Konkov (2018) comprendía estimar la relación de los parámetros en las cubiertas verdes, obteniendo que la tasa de cobertura y el índice de área foliar son los más críticos dentro del balance. Por otro lado, la resistencia estomatal afecta ligeramente tanto al calor latente como a la evapotranspiración.

Por último, Konkov (2018) simula 54 escenarios diferentes en ámbitos como el clima, altura del sustrato, cobertura vegetal, resistencia estomatal y aislamiento. Por lo pronto, obtiene que las cubiertas ajardinadas optimizan el rendimiento térmico a través de la masa térmica además del sustrato y la retención de agua de este. Finalizando, se debe agregar que, entre mayor sea la capa de vegetación, menor será el flujo a través de la cubierta debido al efecto del sombreado donde se disminuye el intercambio de radiación de onda larga con el ambiente.

Uno de los principales modelos en el cual están basados autores como Sailor (2008) al igual que Konkov (2018) es el modelo de resistencia rápida de suelo en todas las estaciones, denominado FASST desarrollado por Frankenstein & Koenig (2004a) para el cuerpo de ingenieros del ejército de Estados Unidos donde se contempló el cálculo del balance de energía y de agua que determina la magnitud del flujo de calor y humedad en el suelo al igual que el intercambio de calor y humedad

en todas las superficies estudiadas. Todo esto, lo hicieron con ayuda de nueve módulos de sección donde en cada uno se realiza el cálculo de diferentes procesos siempre y cuando se conozcan parámetros meteorológicos necesarios como lo son radiación, temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento, profundidad de nieve y precipitación.

El formato de programa básico de los módulos del FASST cumplen las siguientes funciones: lectura de datos meteorológicos, conversiones de unidades y suposiciones necesarias; en ausencia de información de flujo solar o infrarrojo, se generan valores basados en el tipo de nubes en el caso del flujo solar, mientras que, para el IR, este depende de la temperatura y no podrán ser originados sin la ayuda de otras variables y procedimiento.

Asimismo, realiza lecturas de archivos de control sobre las condiciones iniciales, el perfil del sustrato y datos meteorológicos; inicializar el perfil y estado del suelo; luego de estas tareas, procede con el inicio del clico del cálculo principal de procesos y variables como: flujos infrarrojos emitidos y netos, temperaturas del suelo y perfiles del contenido de humedad volumétrica, comprobación del estado (congelamiento o descongelamiento, pero no aplica para el presente proyecto) y cálculo de la resistencia del suelo; verificación del incremento del tiempo del cálculo y por último envía o muestra los diferentes resultados obtenidos.

El primer proceso y de vital importancia que influye en el balance energético citado por Frankenstein & Koenig (2004a) es la radiación solar de onda corta de la “profundidad óptica” de las nubes. El primer subproceso necesario en el cálculo de la radiación de onda corta es la radiación de onda corta descendente donde en el modelo FASST es determinado tal como lo hizo Shapiro (1972, 1982, 1987) través de un modelo sencillo que tiene en consideración observaciones meteorológicas estándar donde los autores traídos a colación adicionan el albedo superficial del

suelo, la reflectancia, transmisión y absorción de la capa además del ángulo cenital solar y el estado de la atmósfera por medio de una base de datos nombrada SOLMET.

El siguiente subproceso descrito para el cálculo de la radiación de onda corta o también expresada como radiación solar, es la radiación de onda corta reflejada, la determinan a partir del flujo de onda corta descendente y el albedo de superficie; habría que mencionar, además, la radiación neta de onda corta la cual determinan sobre una superficie horizontal y depende de los intercambios de flujos de solares tanto entrantes como salientes en la superficie. Los flujos antes mencionados, hacen parte del concepto de una superficie plana para el modelo FASST, mientras que en caso de ser inclinada citan que se deberán usar factores de corrección para obtener la insolación en la superficie. Dentro de esta asunción se debe tener claro parámetros como la pendiente de la superficie y el acimut relativo.

Por último, como parte del cálculo de la radiación de onda corta (solar) se encuentra el flujo solar neto en una superficie inclinada incidido por el flujo solar descendente directo en el suelo corregido para una superficie inclinada, el flujo solar difuso descendente en el suelo corregido para una superficie inclinada junto con el flujo solar ascendente corregido para una superficie inclinada.

Para el proceso de validación de este primer proceso fueron necesarios datos del programa de campo mejora de la operatividad de las armas inteligentes (SWOE). El programa se estudió durante 3 épocas y años diferentes entre sí, donde cada uno duró 44 días recopilando, en paralelo, información meteorológica en un área de 2 km² con frecuencia temporal por minuto.

En esta validación del flujo solar de onda corta, se realizó una comparación entre los datos obtenidos producto de la simulación con los conceptos antes mencionados junto con los registros de estaciones meteorológicas, donde para las 3 épocas en años diferentes obtuvieron que siempre

se presenta que los flujos del modelo tienden a ser mayores que los medidos, sin embargo la mayor dispersión siempre se presentó en el flujo de calor difuso en los 3 casos debido a que al realizar el contrato, se hizo una representación inadecuada de la nube tanto en la cantidad como en la profundidad óptica, por lo que siempre el autor generó un índice de correlación bajo en comparación a los flujos solares totales y directos.

Para concluir este primer módulo, el modelo requería como entradas: latitud y longitud de la ubicación, el día del año y la hora, la categoría de la superficie terrestre, la cantidad fraccional de nubes bajas, media y alta y por último el tipo de nube (media, baja o alta) y se obtenían como salidas de este primer submodelo del general se tiene el flujo descendente, reflejado y neto de onda corta en la superficie para los parámetros de ingreso.

El siguiente módulo determinado por Frankenstein & Koenig (2004a) y también caracterizado como importante para el balance energético en la superficie es la radiación de onda larga, sin embargo, hay que destacar que los registros de esta misma variable no son de fácil acceso por lo que plantea usar parámetros y modelos disponibles para el cálculo subsecuente.

El primer subproceso dentro este módulo desarrollado en el FASST es la radiación de onda larga descendente, en este a su vez, se relaciona la superficie de la atmosfera como uno de los principales componentes. Se debe agregar que, se toma en consideración la emisividad atmosférica efectiva, la temperatura del aire y la constante de Stefan-Boltzmann para este primer subproceso. En caso de que el cielo esté nublado, se utilizad otra fórmula para el flujo descendente compuesta por la cantidad fraccional de nubes bajas, cantidades efectivas de nubes medias y altas basadas en el principio de superposición aleatorio y el factor de irradiancia para nubes bajas, medias y altas. Además, se encuentra una tabla donde de acuerdo con la estación (invierno y no invierno) y la latitud se estiman los coeficientes de parametrización incluyentes en el cálculo de este subproceso.

Para la validación del modelo de flujo infrarrojo descendente, también se hizo del mismo modo que el primer módulo (flujo solar de onda corta) donde se tomaron datos del programa SWOE llevados a cabo durante el otoño de 1992, el invierno y primavera de 1994 y la primavera/verano de 1993. Luego, realizando comparación entre datos medidos y simulados respecto al flujo infrarrojo, se observó el mismo comportamiento que en el caso del módulo anterior donde los flujos medidos fueron mayores que los calculados, sin embargo, el índice de correlación calculada para los conjuntos de datos de los tres escenarios en los años antes descritos estuvo siempre por encima del cero, siendo de 0.8655, 0.6221 y 0.8345, respectivamente.

Por último, como entradas del modelo, se destacan la latitud de la ubicación, el día y hora del año, la categoría de superficie terrestre, temperatura ambiente del aire, humedad relativa, temperatura de la superficie, cantidad fraccional de nubes baja, media y alta, tipo de nube baja, media y alta y por último nube de altura baja, media y alta. Como resultado del modelo se obtiene la radiación descendente, ascendente y de onda larga neta en la superficie con base en los parámetros de entrada.

Es de adicionar que el siguiente modelado desarrollado por Frankenstein & Koenig (2004a) dentro del FASST es el de la temperatura del suelo, que a su vez depende del estado de humedad del mismo y del forzamiento de la superficie, el viento, la humedad relativa, la precipitación, la temperatura del aire y la presencia de nubes.

El primer proceso para la determinación de esta variable es el modelo térmico del suelo, donde a través de un gradiente de temperatura en una capa de suelo no uniforme relaciona la temperatura, el tiempo, la difusividad térmica, el calor específico del agua y del suelo, la tasa del flujo del agua, el calor latente de fusión, el hielo volumétrico contenido, la densidad del agua y, por último, el espesor o profundidad de la superficie. Ahora bien, dicha temperatura en paralelo está sujeta a una

condición límite que depende del albedo y la radiación solar total de la superficie, la radiación de onda larga entrante y saliente tanto reflejadas como emitidas, el calor sensible y latente y la conductividad térmica de la superficie.

Para el modelo térmico del suelo, como ya se ha mencionado, es necesario contar la radiación solar tanto la directa como la difusa. Sin embargo, como las superficies de los sustratos en muchos casos no son uniformes u horizontales, se toma en consideración el efecto de la pendiente para el impacto de la radiación solar determinada por el ángulo cenital y el azimut. Se debe añadir que, también es necesario el cálculo de la radiación de onda larga para el modelo térmico donde se utiliza la función de Planck. Es conveniente mencionar el flujo de calor sensible como adición para el modelo térmico de suelo el flujo de calor latente. Para la generación de calor latente debe existir una diferencia de vapor entre la superficie y la atmósfera.

El último proceso del modelo térmico es el flujo de calor de precipitación, involucrando la temperatura de la lluvia nombrada como bulbo húmedo, el calor específico del agua, el flujo de precipitación másico y la densidad de dicha precipitación. Para la solución de la ecuación del flujo de calor dimensional se emplea un método de Crank-Nicholson de segundo orden, la técnica de Hornbeck (1975) el método de Newton-Raphson y la técnica de (Kahle, 1977).

Dado que es necesario determinar el perfil de temperatura vertical del suelo, regido por parámetros físicos de los materiales como el albedo superficial, la emisividad y la conductividad y difusividad térmica, se trae a colación el método de Johansen (1977) para la determinación de la conductividad en función del tipo de suelo, densidad seca, grado de saturación, conductividad térmica seca y saturada, conductividad térmica de los sólidos del suelo, agua descongelada y el número de Kersten.

Por último, para la validación del modelo de temperatura del suelo se comprobó de la misma manera que se han hecho los anteriores a través de los valores registrados en las épocas de otoño, primavera e invierno, solamente con la variación del año de los registros, siendo 1992, 1993 y 2002, respectivamente. Las ciudades donde se recopilaron los datos fueron Yuma y Grayling con suelo arenoso y Hanover con pavimento. Tanto para el estudio de la ciudad de Yuma como para de Grayling, se concluyó que la correlación entre los datos es muy cercana, incluso, teniendo en cuenta el tipo de suelo arenoso para ambas ciudades, generó que Frankenstein & Koenig (2004a) probaran cuatro tipos de suelos (arena limosa, arena bien gradada con pocos finos, arena mal gradada y arena arcillosa) y así observar que de todos modos existe una alta correlación entre los mismos. En el caso de la ciudad de Hanover, las predicciones de la temperatura se asocian de manera positiva con los registros recopilados para el Cuerpo de Ingenieros del Ejército.

El siguiente módulo establecido en FASST es la humedad y resistencia del suelo, en el que se establecen subprocesos para calcular el cambio de volumen del contenido de humedad a lo largo del tiempo, lo que se considera un paso clave para determinar el estado del suelo.

Para el cálculo de la ecuación que gobierna el flujo de humedad a través de un suelo con masa conservada se realiza por medio de una solución numérica usando un esquema que tiene en cuenta la porosidad, el tiempo y la profundidad donde todo a su vez es calculado mediante la técnica de Newton-Raphson para que la ecuación matricial final incluyendo la conductividad hidráulica saturada junto a diferentes tipos de suelos descritos por Frankenstein & Koenig (2004a) a través de recopilación de cinco autores diferentes. Tal como se ha hecho con los otros modelos, la validación se realizó por medio de los datos del programa SWOE en ubicaciones de Grayling, MI y Yuma, donde los registros de humedad de suelos fueron tomados una vez al día. En todos los

casos, el modelo genera confiabilidad en las simulaciones de la humedad, obteniendo pequeños márgenes de error debido a cambios en la evaporación / condensación de la superficie.

Por otro lado, está el modelo de resistencia de suelo, el cual fue desarrollado para la predicción de la resistencia de a la humedad del suelo. En este, se usa índice de cono para simular la resistencia de un suelo donde se le aplica una fuerza vertical dividida por su superficie. Entre tanto, el índice de cono de clasificación se usó para la representación de la resistencia original del suelo retenida después de que los carros pasen por encima. La muestra es colocada en el cilindro sometida a 100 golpes con un martillo de 2,5 libras.

Otro apartado del modelo FASST es la simulación del estado de reposo descrito a través de un modelo simple junto a cálculos de congelación y descongelación por medio de relaciones de equilibrios de flujos evaluando temperaturas de la superficie como entradas de energía y parámetros del sustrato o medio de crecimiento y luego esas mismas temperaturas son usadas para expresar los flujos. Frankenstein & Koenig (2004a) inician con una configuración física donde asumen que el proceso de cambio de fase es de igual medida. La regla fundamental del que describe en estado del suelo es el contraste de la energía necesaria para congelar o descongelar el medio de crecimiento con profundidad determinada. Tal proceso que contempla la energía necesaria depende de la temperatura del nódulo, los componentes del suelo (suciedad, agua, hielo y aire), la densidad del componente y el calor específico.

Por último, la validación del modelo de congelación/descongelación usaron datos del invierno de 1990-1991, donde se obtuvo que las mayores diferencias estuvieron en la descongelación debido a que en el modelo FASST se produce parcialmente pues existe desigualdad en las fechas de derretimiento de la nieve entre la simulación y los registros.

El siguiente módulo, contiene la acumulación de nieve, agotamiento y salida de agua de deshielo, sin embargo, en el caso de estudio en cuestión no se presentan estas condiciones por lo que se detalla a manera no tan profunda. En esta modelación, fue empleado el paquete de análisis numérico Snowmelt (SNAP) desarrollado por Albert & Krajewski (1998). La directriz de este se basó en la física para recrear las condiciones del deshielo, donde se asumió que el flujo a través de la nieve y el deshielo es impulsado por una energía presente en la superficie de la nieve. Cuando se da precipitación en la entrada o cantidad de nieve es porque se presenta acumulación de esta y por tanto la temperatura del aire quiere decir que está por debajo del punto de congelación, siendo para este último escenario la magnitud de la precipitación convertida en una de nieve.

Como entradas se requieren datos de estaciones meteorológicas como temperatura del aire, velocidad del viento, radiación solar total, radiación solar de onda larga y la precipitación. Como salida, se genera la profundidad de la nieve y el volumen de agua que ha sido evacuado de la misma capa. En el escenario de validación, se generan errores entre el 1 y 7% los cuales son aceptables al estar por debajo del 15% tal como lo menciona (Holcombe et al., 2004)

El último apartado en FASST es el modelo del espesor de hielo, donde al ser principalmente analizado como un escenario para el tránsito de vehículos, este se vuelve complejo para el caso de la movilidad de los autos y sucede cuando el suelo está en el punto o por debajo de la congelación y cualquier escenario con precipitación se convierte en lluvia en vez de nieve. Este módulo depende del crecimiento, ya que en ausencia de nieve se genera una capa de hielo, mientras que en caso contrario se asume que la lluvia que cae se mantiene en la capa de nieve.

Ahora bien, Frankenstein & Koenig (2004b) publicó otra investigación meses posteriores al modelo inicialmente planteado donde agregaron un algoritmo de vegetación multicapa de dos niveles los cuales generan variación sobre la energía y humedad del sustrato.

Para iniciar el modelo de vegetación rápida, se empieza con el modelado de vegetación baja para arbustos, cultivos, hierba, entre otros. Para ello, emplean un modelo a través del método de las placas paralelas semi-infinitas en estado estacionario desarrollado a la vez por Deardoff (1978) y (Balick, Link, et al., 1981), donde se considera la emisividad, albedo, altura y cobertura fraccional del follaje. En el caso del modelamiento energético de la atmosfera y la vegetación comprendido dentro del modelo rápido, incluyen un balance donde la suma de los flujos solares e infrarrojos absorbidos, el flujo de onda larga emitido y el calor sensible, el calor latente y la precipitación son iguales a cero. Tal balance, es resuelto a través de ecuación polinomial de grado n para la temperatura del follaje K obtenido a través de un algoritmo de búsqueda de raíces como se presenta en la ecuación a continuación:

$$F = 0 = \sigma_f [I_s^\downarrow (1 - \sigma_f) + \varepsilon_f I_{ir}^\downarrow - \varepsilon_f \sigma T_f^4 - P_f] + \frac{\sigma_f \varepsilon_f \varepsilon_g \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_f + L_f \quad (\text{Ecuación 21})$$

En este intercambio de energía entre la atmosfera y el follaje T_g representa la temperatura del suelo, ε_g la emisividad del suelo, σ la constante de Stefan-Boltzman ($5.699 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$), I_s^\downarrow el total de la radiación solar entrante, I_{ir}^\downarrow el total de la radiación infrarroja entrante, H_f el flujo de calor sensible, L_f el flujo de calor latente y P_f el flujo de calor de precipitación. En caso de no conocer la cobertura fraccional (σ_f) proponen aplicar un método desarrollado por (Ramírez & Senarath, 2000) el cual no será descrito en el presente proyecto.

En el modelo energético de la atmosfera y la vegetación es necesario determinar la radiación de solar e infrarroja representado como $\sigma_f I_s^\downarrow (1 - \sigma_f)$ en la ecuación 21 muestra el flujo solar absorbido por la vegetación. En esta radiación, se tiene en cuenta el flujo solar absorbido por la vegetación (I_s^\downarrow) al igual que el flujo solar transmitido por la vegetación al suelo subyacente dado

por $I_s^\downarrow(1 - \sigma_f)$. Por medio del término $\frac{\sigma_f \varepsilon_f \varepsilon_g \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4)$ de la ecuación 21 que describe el intercambio radiactivo entre el suelo y la vegetación, es calculado a partir del método sumatorio de transferencia radiactiva de dos capas incluyendo múltiples reflejos. Además, para llegar a la expresión final de la radiación total de onda larga se debe tener en cuenta aquellos flujos emitidos y absorbidos por la vegetación en múltiples reflexiones, donde finalmente se llega al término:

$$\frac{\sigma_f \varepsilon_f \varepsilon_g \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4); \varepsilon_1 = \varepsilon_f + \varepsilon_g - \varepsilon_f \varepsilon_g \quad (\text{Ecuación 22})$$

ε_g representa la emisividad del suelo que varía en función del tipo de sustrato entre 0.92 a 0.97.

El siguiente flujo que hace parte del modelo FASST es el calor sensible generado entre la vegetación y el aire que rodea la misma dado por la siguiente expresión:

$$H_f = (e_0 + 1.1 * LAI * \rho_{af} * c_{p,a} * C_f * W_{af})(T_{af} - T_f) \quad (\text{Ecuación 23})$$

Donde: e_0 es el coeficiente de intercambio sin viento para calor sensible, C_f el coeficiente de transferencia de Bulk, T_{af} la temperatura del aire en la vegetación dada en Kelvin, W_{af} es la velocidad del viento en la interfaz aire/follaje, $c_{p,a}$ es el calor específico del aire a presión constante y por último el término ρ_{af} representa la densidad del aire en el follaje calculada por medio de la ley de los gases ideales.

Es importante agregar también el intercambio de flujo de calor latente entre el follaje y la atmósfera circundante dado como (Deardoff, 1978):

$$L_f = LAI * \rho_{af} * C_f * l * W_{af} * r''(q_{af} - q_{f,sat}) \quad (\text{Ecuación 24})$$

Donde l representa el calor latente de la evaporación o sublimación dependiendo de la temperatura del aire y de la superficie; q_{af} es la mezcla del aire en la interfaz del follaje, $q_{f,sat}$

se traduce como la mezcla del follaje saturado y el término r'' representa la humedad de la superficie del follaje y es una función que depende de la resistencia del aire y de los estomas a la difusión de vapor.

Como último intercambio de calor se halla el flujo de calor por precipitación para una superficie en ausencia de vegetación donde se asume que toda la lluvia que cae tiene contacto con el suelo, mientras que si existe vegetación esta será interceptada. De esta precipitación que es captada, una parte se almacena, mientras que otra se evapora, otra transpira y una última gotea.

Finalmente se presenta la ecuación de energía final entre la vegetación y la atmósfera producto de los flujos de calor antes descritos a través de la siguiente ecuación Frankenstein & Koenig (2004b):

$$F_f = 0 = \sigma_f [I_s^\downarrow (1 - \alpha_f) + \varepsilon_f I_{ir}^\downarrow - \varepsilon_f \sigma T_f^4 - \gamma_p [1.0 - \exp\{-0.5(LAI + SAI)\}] P_r c_p T_p] + \frac{\sigma_f \varepsilon_f \varepsilon_g \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + (e_0 + 1.1 * LAI * \rho_{af} * c_{p,a} * C_f * W_{af})(T_{af} - T_f) + LAI * \rho_{af} * C_f * l * W_{af} * r''(q_{af} - q_{f,sat})$$

(Ecuación 25)

Sin embargo, en la ecuación 25 los términos T_g y T_f son desconocidos, por tanto, se formula otra ecuación del intercambio de calor entre la vegetación y el suelo presentada como:

$$F(T_g) = 0 = (1 - \sigma_f) [I_s^\downarrow (1 - \alpha_g) + \varepsilon_g I_{ir}^\downarrow - \varepsilon_g \sigma T_g^4] - P_g - \frac{\sigma_f \varepsilon_f \varepsilon_g \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_g + L_g + \kappa \frac{\partial T_g}{\partial z} + l_{fus} \frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{\partial \theta_g}{\partial t} \Delta z - v c_p T_g$$

(Ecuación 26)

En la ecuación anterior tanto α_g como ε_g son funciones del tipo de suelo el cual se encuentran entre los rangos de 0.23 a 0.40 y de 0.92 a 0.97, respectivamente. $\kappa \frac{\partial T_g}{\partial z}$ cuantifica el calor de conducción hacia y desde la superficie del suelo subyacente dependiente del gradiente de temperatura. $l_{fus} \frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{\partial \theta_g}{\partial t} \Delta z$ representa el calor liberado y absorbido por el suelo a medida que la humedad de este disminuye o se congela (aumenta). Por último, el calor que se aleja o se acerca hacia la superficie debido al movimiento vertical de la humedad viene dado por $vc_p T_g$.

Para el balance de energía presentado en la ecuación 26 se debe tener en cuenta el flujo de calor sensible que depende de la densidad del aire en la interfaz follaje-suelo determinado por medio de la ley de los gases ideales, la presión atmosférica y la temperatura del aire en la vegetación cerca al suelo. A su vez, este proceso o flujo involucra el coeficiente de transferencia a granel cerca al suelo, la rugosidad de este y el número de Schmidt y Richardson.

Por otro lado, también se debe tener en cuenta el intercambio de calor latente en la vegetación-suelo, que a su vez también toma en consideración el coeficiente de transferencia a granel, el número de Prandtl, el calor latente por evaporación o sublimación dependiendo de la temperatura de la superficie del sustrato y por último las proporciones de mezclas del aire en la superficie y en la capa de la vegetación. De manera análoga, también se estima el flujo de calor por precipitación o lluvia relacionado con la tasa de precipitación, la cantidad que intercepta el follaje y la cantidad que gotea de la vegetación si la humedad en la superficie de la hoja excede el límite de almacenamiento.

Por último, teniendo en cuenta los anteriores flujos (de precipitación, latente y sensible) se obtiene la ecuación final de energía en la vegetación/suelo expresada como:

$$\begin{aligned}
F(T_g) = 0 = & (1 - \sigma_f)[I_s^\downarrow(1 - \alpha_g) + \varepsilon_g I_{ir}^\downarrow - \varepsilon_g \sigma T_g^4] - \gamma_p(P_r - I + D)c_p T_p \\
& - \frac{\sigma_f \varepsilon_f \varepsilon_g \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + (e_0 + \rho_{ag} c_{p,a} C_h^g W_{af})(T_{af} - T_g) \\
& + C_e^g l W_{af} \rho_{ag} M_g (q_{af} - q_{g,sat}) + \kappa \frac{\partial T_g}{\partial z} + l_{fus} \frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{\partial \theta_g}{\partial t} \Delta z - v c_p T_g
\end{aligned}$$

(Ecuación 27)

En el momento de obtención de resultados, Frankenstein & Koenig (2004b) no contaban con el dato del gradiente de temperatura desde la superficie del sustrato hasta el suelo, por lo que realizaron comparaciones entre los registros de temperatura de la superficie del suelo junto a las modelaciones de humedad y profundidad de la nieve con diferentes tipos de densidades en la vegetación. Asimismo, recopilaron datos desde septiembre hasta noviembre de 1992 donde el suelo tenía una clasificación de arena limosa (SM) y tipo de vegetación “pasto alto”. El resto de los parámetros fueron por defecto para las demás variables.

En la simulación de la humedad del suelo, obtuvieron que a medida que aumenta la capa de vegetación, se reduce la capacidad de respuesta del suelo a las tormentas. Del mismo modo, se generó mediante el modelo que, a mayor densidad de vegetación, menores serán las sequías del sustrato y a la vez se disminuyen las fluctuaciones diurnas. En ese mismo orden de ideas, se concluye que la vegetación genera efectos similares sobre la temperatura por medio de este modelo, pues a medida que aumenta la cantidad de vegetación, se controla el calentamiento del suelo de la superficie.

Por último, concluyendo el modelo para baja vegetación obtienen la variación de la temperatura del follaje en función de la densidad de este. Al mismo tiempo, afirman que la hierba de mayor densidad es más caliente que la de menor densidad cuando ambas están secas.

Ahora bien, el siguiente modelo tratado fue para vegetación “alta”, es decir árboles grandes donde examinan los gradientes de temperatura y energía en el interior de una densa vegetación o un bosque. Esta simulación comprende un balance de energía semi-infinito de tres placas paralelas en estado estacionarios, una capa atmosférica sobre el dosel y una capa de sustrato debajo del dosel. En dicho modelo se incluye la radiación de onda larga y onda corta junto a las interacciones en todas las capas y la evapotranspiración. La ecuación general que representa el balance de energía el cual abarca cinco capas de sumideros y fuentes es el siguiente:

$$F_c = 0 = \sum_{i=1}^3 \left[A_c^i \left(I_{ir}^\downarrow S_{il} + \sigma \sum_{j=2}^4 \varepsilon_c^j (T_c^j)^4 S_{ij} + \varepsilon_g \sigma T_g^4 S_{i5} \right) - \sigma \varepsilon_c^i (T_c^i)^4 \sum_{k=1}^5 S_{ki} + a_c^i I_s^\downarrow + H_c^i + L_c^i - P_c^i \right] \quad (\text{Ecuación 28})$$

En la anterior ecuación 27, el último término, P_c^i , cuantifica el calor por precipitación; los flujos de calor turbulentos son representados por $H_c^i + L_c^i$; el flujo por radiación de onda corta viene dado por I_s^\downarrow . La emisividad se describe como ε_c^i , a_c^i y A_c^i , los coeficientes por absorción de capa de onda corta y onda larga están dados por i ; I_{ir}^\downarrow medida en W/m^2 es la radiación de onda larga entrante y la radiación de onda corta entrante se cita por I_s^\downarrow (W/m^2), T_c^i es la temperatura de la capa i del dosel, σ es la constante de Stefan-Boltzman ($5.699 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$) y, por último S_{ij} es la matriz de transferencia de onda larga entre la capa sumidero i y la capa fuente j .

Un esquema desarrollado por Frankenstein & Koenig (2004b) es del modelo del dosel antes descrito por la ecuación 28 es el siguiente:

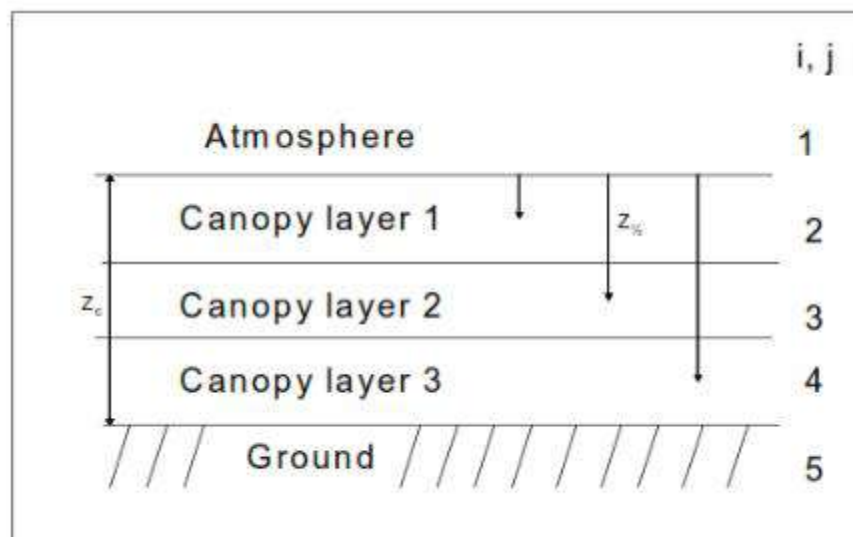


Ilustración 9 - Capas del modelo ilustradas en el FASST

Fuente: (Frankenstein & Koenig, 2004a)

Para la radiación infrarroja descendente en la parte superior de la cubierta representado por el término I_{ir}^{\downarrow} es igual a la emisividad de onda larga y cambia constantemente con relación a las estaciones. Este proceso incluye conocer también el índice de área foliar (*LAI*), la emisividad, la pérdida de energía, la distribución de la pendiente de las hojas (el cual no será detallado en el presente artículo), entre otros más subprocesos para obtener la ecuación final de la radiación infrarroja que será usada en la solución numérica propuesta por Frankenstein & Koenig (2004a).

Además, es de tener en cuenta también el flujo de calor sensible tal como lo calculó Deardoff (1978) y Dickinson et al. (1986) donde se tiene en cuenta la densidad del aire calculada por medio de los gases ideales, la presión atmosférica, temperatura del aire y de la vegetación junto a la velocidad del viento en la parte superior del dosel. Por otro lado, se planteó la fórmula que representa la evapotranspiración o flujo de calor sensible, también, basado en el método de

Deardoff (1978) teniendo en cuenta el calor latente de evaporación o sublimación dependiendo de la temperatura y la humedad en la vegetación.

Por último, se encuentra el flujo de calor por precipitación para la capa del dosel el cual depende del índice de área foliar, la tasa de cobertura fraccional vegetada, entre otras.

Una vez definidos los cinco tipos de flujos se plantea nuevamente la solución numérica (balance de energía para el dosel) alterando la ecuación 28 y combinando los planteamientos realizados por el autor citado, obteniendo la siguiente solución numérica:

$$\begin{aligned}
 F_c = 0 = \sum_{i=1}^3 \left[A_c^i \left(I_{ir}^\downarrow S_{il} + \sigma \sum_{j=2}^4 \varepsilon_c^j (T_c^j)^4 S_{ij} + \varepsilon_g \sigma T_g^4 S_{i5} \right) - \sigma \varepsilon_c^i (T_c^i)^4 \sum_{k=1}^5 S_{ki} \right. \\
 + (1 - \Psi_i) \left[S_{il} + \sum_{j=2}^5 B_j S_{ij} \right] I_s^\downarrow - (e_0 + 1.1 LAI^l \rho_{ac}^i c_{p,a} C_c^i) (T_{ac}^i - T_c^i) \\
 - LAI^i \rho_{ac}^i C_c^i l W_{ac}^i (r_c^i)'' (q_{ac}^i - q_{c,sat}^i) \\
 \left. + \gamma_p \sigma_c^i [1.0 - \exp\{-0.5(LAI^6 + SAI^i)\}] P_r^i c_p T_p \right]
 \end{aligned}$$

(Ecuación 29)

Para la obtención de resultados del modelo la adición al modelo FASST hecha por Frankenstein & Koenig (2004a), realizaron una validación de ambos modelos, tanto el de vegetación baja como el de la alta, en el cual se usaron datos en Michigan del año 1992 de las condiciones superficiales. Las variables de entrada fueron Índice de Área foliar (LAI), factor de aglomeración de Markov (M), absorción de onda corta y la emisividad de onda larga. El tipo de vegetación tenía densidad comprendida entre el 50% y el 80%.

En el caso de comparación de la temperatura en el dosel en la vegetación alta (árboles), se aprecia que inicialmente los registros de esta variable en el aire están por encima de los modelados para la cubierta. Sin embargo, la diferencia entre la medición y el modelado es mínima para la comparación entre la temperatura del aire y la del dosel por la noche especialmente. En el día, los registros de temperaturas expresan máximo un (1) K de diferencia. Por último, concluyen que el suelo siempre tendrá temperaturas mayores y como tal todo el sistema de la cubierta parecería cumplir la función de aislante térmico.

Por último, Frankenstein & Koenig (2004a) combinaron ambos modelos (vegetación baja y alta) debido a que comúnmente en suelo de algún bosque contenga vegetación baja, por tanto usaron densidad del 78% para dicha clase de vegetación (baja). Al realizar esta combinación, se notó una reducción considerable en la humedad de la superficie durante una tormenta debido a la capacidad de absorción de la vegetación y también se evita una pronta sequía en caso de un suelo sin vegetación.

Por otro lado, la temperatura superficial al igual que la humedad para baja vegetación tiene mayor influencia obteniendo que hay similitud entre la temperatura del aire y la de la vegetación, sin embargo, para el caso de las temperaturas superficiales, se presenta que en el suelo son más bajas que en el escenario del modelo combinado y al igual que en la simulación de la vegetación alta.

De igual forma, dentro de los estudios realizados donde determinan la influencia de la vegetación, el sustrato y aislamiento de una cubierta en el desempeño de la energía, se encuentra el análisis hecho por Vera et al. (2017) en climas semiáridos y climas marinos. Para la modelación térmica de edificaciones, emplearon el software EnergyPlus en un escenario de cubierta vegetal.

En el clima semiárido se tomó en consideración un modelo de edificio en Albuquerque y Santiago de Chile, mientras que para el clima marino fue la ciudad de Melbourne en Australia. Los parámetros que varían para la investigación es la composición de la cubierta de acuerdo con las tradicionales y vegetales, al igual que el índice de área foliar LAI, el sustrato y sus propiedades y el nivel de aislamiento de la cubierta. El prototipo contó con espesor de sustrato de 0.15m y altura de plantas de máximo 0.30, como usualmente se presentan en cubiertas de tipo extensivo. Por otro lado, tomaron en consideración dos tipos de sustratos, secos y húmedos, con propiedades de rangos (0.15-0.3 W/mK) y (0.5-1.2 W/mK), respectivamente. Así mismo, emplearon un sistema de riego con tasa de 4.2 mm/h para garantizar el contenido volumétrico de agua, crecimiento, supervivencia de las plantas en todas las épocas del año.

Ahora bien, el estudio realizado comprendía diferentes escenarios como lo eran 1) losa de hormigón aislada y 4) cubierta metálica aislada por el caso de sistemas comerciales y 2) cubierta vegetal sobre losa de hormigón, 3) cubierta vegetal sobre losa de hormigón no aislada, 5) cubierta vegetal sobre cubierta metálica aislada y por último 6) cubierta vegetal sobre cubierta metálica no aislada (Vera et al., 2017). Adicionalmente, el modelo de humedad seleccionado fue el simple.

Agregando a lo anterior, el modelo numérico de la cubierta vegetal fue adaptado del FASST desarrollado por (Frankenstein & Koenig, 2004a)(Frankenstein & Koenig, 2004b), el Biosphere Atmosphere Transfer Scheme y el modelo Simple Biosphere consistieron en una sola capa de vegetación sobre la superficie del sustrato permitiendo el cálculo de las temperaturas del dosel y de la superficie del medio de crecimiento a través del software EnergyPlus en aras de obtención del flujo de calor a través de todo el sistema de la cubierta.

Como resultados de flujos de calor, se mencionan aquellos que se presentan en tres de los escenarios planteados como objeto de desarrollo de este proyecto, el primero es en el prototipo de

la losa de hormigón sin aislamiento y sin vegetación donde se presentan las mayores ganancias térmicas en el día con $10\text{W}/\text{m}^2$, sin embargo, en el mismo caso de la losa con vegetación sin aislante se generan pérdidas desde las 8AM hasta las 10PM, lo que deja en claro que el follaje (plantas) ayuda con la reducción de dichos flujos de calor entrantes al igual que con las cargas de refrigeración. En el otro escenario (cubierta metálica aislada con vegetación) es donde se registran pérdidas de calor por medio del tejado a excepción de las 4pm que es donde están las menores.

Hay que mencionar, además que el índice de área foliar (LAI) genera influencia en las cargas de calefacción y refrigeración de las cubiertas de hormigón sin aislamiento y de metal ligero (Vera et al., 2017). Los valores para este índice oscilan entre 0.1 y 5 para techos con vegetación en las ciudades analizadas por estos autores; mientras que la radiación solar media y velocidad del viento están por debajo de $300\text{W}/\text{m}^2$ y $2\text{m}/\text{s}$, respectivamente, es decir que al incrementar el LAI, se genera reducción en las pérdidas de calefacción en la cubierta vegetal.

Para el caso de la temperatura del sustrato, analizadas en Santiago con todos los escenarios de cubierta, se presenta que, durante el verano, el proceso de evapotranspiración incrementa gracias a la radiación solar. Sin embargo, al generarse mayor sombreado, esto provoca menores temperaturas de la superficie del sustrato y por tanto las cargas de refrigeración serán menores. Además, cabe señalar que el impacto del LAI varía según el tipo de sustrato, ya que en el caso de la cubierta vegetal de Melbourne (no aislada) con un sustrato más ligero con un LAI de 0,1, la carga térmica es un 82% menor que la de un sustrato pesado con la misma cobertura. En contraste, un techo con una base más pesada tiene una carga de enfriamiento menor (aproximadamente 24% y 22%) que un techo con una base más liviana.

En el caso del impacto de sustratos livianos (LW) y pesados (HW) sobre el desempeño térmico de cubiertas verdes, se muestra que, en el caso de cubiertas no aisladas y cubiertas aisladas, el

rango de reducción está entre 58% y 77%, respectivamente. En el caso de un techo aislado, está entre el 4% y el 10%. En contraste, la carga de enfriamiento de un techo verde sin aislamiento y un material base más liviano es aproximadamente un 33% y un 47% menor que la de un techo vegetal con un material base más pesado. Estos resultados se atribuyen, en especial, a la conductividad térmica del sustrato ligero, que es cuatro veces menor que la del pesado, pero en el caso de la difusividad térmica presentan valores similares para ambos casos lo que interpreta igualdades en las transferencias de calor a través de la estructura de cubierta en el verano donde son más representativas las oscilaciones de temperatura. Por otra parte, en el invierno, las variaciones de temperaturas son menores, por lo que la conductividad térmica influye en mayor proporción que la masa térmica en la transferencia de calor a través del sustrato.

Por último, Vera et al. (2017) realizan las gráficas de los flujos de calor para la cubierta metálica no aislada con sustrato ligero y sustrato en diferentes valor de LAI (0.1, 1, 3 y 5) en el verano en Santiago. Dichos flujos disminuyen de manera considerable al encontrarse un índice de área foliar más alto gracias al incremento de la evapotranspiración y del sombreado. Para los suelos ligeros, estos presentan flujos de calor más bajos que con suelos pesados gracias a la conductividad térmica.

Como conclusiones del estudio realizado en las ciudades de Albuquerque (USA), Santiago (Chile) y Melbourne (Australia), obtuvieron que, para reducir la vegetación, la carga de enfriamiento se puede reducir de manera más efectiva debido a la evapotranspiración del sistema vegetación-sustrato y el efecto de sombra de la cubierta. Además, señalaron que un techo con poca vegetación sin aislamiento no solo reducirá la ganancia solar del techo, sino que también permitirá que el calor interno se disipe a través del techo durante la ganancia máxima de calor interno. Para finalizar, en el caso de las cubiertas metálicas sin aislamiento, encontraron que son más sensibles

a las variaciones de las características de las cubiertas vegetales en contraste con la losa de hormigón (sin aislamiento), debido a que la losa proporciona mayor inercia a todo el sistema de la cubierta. Sin embargo, el comportamiento térmico de ambos sistemas de cubierta es similar cuando ambos están aislados.

Además, habría que referenciar la investigación desarrollada por Tabares-Velasco & Srebric (2011) donde modelan una cubierta verde de tipo extensiva gracias al bajo costo. En este artículo, describen que la característica de mayor importancia en la simulación del rendimiento térmico es el índice de área foliar (LAI). Además, una causa de las pérdidas de agua en las plantas se debe a los estomas vegetales, los cuales son pequeños poros ajustables en la hoja que permiten el paso de gases necesarios (CO_2 , O_2 y vapor de agua).

En la investigación por los autores referidos, destacan que es importante también, realizar el modelamiento de los techos verdes sin vegetación debido a que no todo el tiempo las estructuras estarán 100% cubiertas a lo largo de la vida útil, por lo que inician considerando el planteamiento de la cubierta sin plantas y luego sí la que está poblada, terminando con una combinación entre las dos simulaciones lo que genera un escenario realista en la actualidad en las edificaciones.

El balance de energía propuesto por estos investigadores a través del escenario de cubierta vegetal sin plantas para condiciones ambientales de estado cuasi-estacionario es el siguiente:

$$R_n = Q_E + Q_{sensible} + Q_{conduction} \quad (\text{Ecuación 30})$$

El análisis de este modelo se realiza por medio de un circuito térmico de resistencias que incluyen el flujo de evaporación del suelo, Q_E , el flujo de calor sensible por convección, $Q_{sensible}$ y el flujo de calor por conducción, $Q_{conduction}$, todos medidos W/m^2 . Sin embargo, el flujo de

calor por evaporación y por convección, fueron agrupados en una sola pérdida de calor por convección, evaporación y radiación, obteniendo una nueva ecuación para el balance como sigue:

$$R_{sh,abs} = Q_{film} + Q_{conduction} \quad (\text{Ecuación 31})$$

El término $R_{sh,abs}$ representa la radiación solar la cual es proporcional a la entrada de radiación de onda corta y se calcula a través de una ecuación que tiene en cuenta la reflectividad del suelo, donde estos valores típicos se sitúan entre 0.10 para suelo húmedos y 0.35 para suelos secos. El método por el cual determinan el coeficiente de calor por convección en una superficie plana por medio de una ecuación que parte del número de Nusselt en los tres tipos de convecciones: forzada, mixta y natural, donde a su vez depende de los números de Grashof y Reynolds.

En el caso de la evaporación del sustrato, el segundo mecanismo de transferencia de calor, toma en consideración la presión de vapor en el aire, la presión de vapor saturada a la temperatura del suelo, la resistencia aerodinámica a la transferencia de masa, la constante psicométrica y por último la resistencia de la superficie del sustrato a la transferencia de masa la cual se basa en que a medida que la superficie del sustrato se seca, el valor de evaporación se presenta en el fondo del medio de crecimiento y por consecuente la resistencia del vapor de agua incrementa.

El cálculo de la resistencia de la evaporación del sustrato se validó por medio de un equipo clasificado como “Cold Plate” el cual simulaba las condiciones de una cubierta verde extensiva, donde en paralelo se realizaron registros de esta tasa a través del método gravímetro y junto a las mediciones del balance energético total en la muestra de la cubierta verde. En la transformación de la ecuación de la resistencia de la evaporación del sustrato, por medio de las mediciones en el Cold Plate, Tabares-Velasco & Srebric (2011) agregaron que, para el contenido volumétrico del sustrato, es necesario incluir la cantidad de poros o espacios presentes en el medio de crecimiento,

por tal razón, hacen una división entre el contenido volumétrico de agua (VWC por sus siglas en inglés) por el VWC en estado de saturación.

Por el lado del calor por radiación de onda larga, entre el ambiente y el sustrato junto a la correspondiente resistencia a la transferencia de calor por radiación térmica en dos cuerpos, donde uno rodea completamente al otro; este, se define a través de la temperatura en la capa superior del medio de crecimiento el contacto con el ambiente o aire.

El último mecanismo de transferencia de calor, analizado en el escenario sin plantas, es el calor conductivo a través del medio de crecimiento de la cubierta, donde fue necesario determinar la conductividad térmica del sustrato y para ello generan una linearización con coeficientes recolectados a través del “Cold Plate” en un suelo que contenía una densidad similar.

Sumado a esto, fueron desarrollando el modelo de transferencia de calor a través del techo verde en el caso de vegetación existente. No obstante, este es similar al escenario sin vegetación debido a que incluye la sombra de las plantas, la transpiración y protección contra el viento, por lo que citan que es una extensión del anterior modelo (sin vegetación). Este modelo se representa a través de las siguientes ecuaciones:

$$R_{sh,abs,plants} = Q_{film,plants} + Q_{IR,S,P}$$

(Ecuación 32)

$$R_{sh,abs,substrate} = -Q_{IR,S,P} + Q_{S,S} + Q_{conduction} + Q_{IR,subs,cov,sky} + Q_E$$

(Ecuación 33)

Donde, en la ecuación 32, $R_{sh,abs,plants}$ se traduce como la radiación de onda corta absorbida por las plantas y $Q_{film,plants}$ vendría siendo la representación entre la transferencia de calor entre las plantas y el entorno por medio del calor latente, la convección y la radiación.

En la ecuación 31, $R_{sh,abs,substrate}$, se interpreta como la radiación solar absorbida por el sustrato bajo las plantas, $Q_{IR,S,P}$ es la transferencia de calor por radiación (de onda larga) que se genera entre las plantas y la capa superior del medio de crecimiento, luego $Q_{S,S}$ también es una transferencia de calor, pero dada por convección entre la capa superior del sustrato y el aire circundante, $Q_{conduction}$ es el flujo de calor conductivo a través de todo el sustrato de la cubierta verde y por último, $Q_{IR,subs,cov,sky}$ es la radiación térmica intercambiada entre el cielo (ambiente) y el suelo de la vegetación.

Entrando en detalle en los diferentes procesos de transferencia de calor, se presenta el primero el cual corresponde a la absorción de la radiación de onda corta y larga por las plantas ($R_{sh,abs,plants}$) y el sustrato ($R_{sh,abs,substrate}$), dependen de las propiedades espectrales de ambas superficies, como también de la densidad de vegetación (LAI). Para el cálculo de la radiación solar absorbida en las plantas, se tiene en cuenta la transmitancia de onda corta del dosel y el coeficiente de extinción. Además, se debe tener en cuenta que la cantidad de radiación solar interceptada depende de la transmitancia de la capa vegetal, de la altitud solar y la orientación de la hoja. Por consecuente, aquella radiación que no absorben las plantas pasa directo al sustrato ($R_{sh,abs,substrate}$) y es transmitida o reflejada en el medio de crecimiento.

Otro proceso para tener en cuenta dentro de las formas en las que se da la transferencia de calor antes mencionadas, el cual se deriva del antes mencionado (absorción de onda corta y larga), es la radiación de onda larga entre las plantas y el sustrato. Este apartado es complejo de determinar,

por lo que analizan el sistema como dos placas o superficies planas como simplificación de la manera del cálculo, donde este autor estima los siguientes tres supuestos: 1. Dos superficies paralelas con áreas diferentes, 2. Dos placas/superficies paralelas infinitas y 3. Área pequeña (sustrato) rodeada por un espacio amplio de plantas. En este proyecto, se adaptó el segundo supuesto de placas paralelas infinitas para el cálculo de la radiación de onda larga entre las plantas y el sustrato. Tabares-Velasco & Srebric (2011) analizaron los tres enfoques obteniendo una diferencia menor al 10% entre los mismos o menos de 4W/m^2 en los resultados.

Sumado a esto y, manejando el mismo enfoque del modelo con plantas, modificaron la ecuación que determina la transferencia de calor por convección agregando un coeficiente de que tiene en cuenta la rugosidad de las plantas y asumiendo que la velocidad en el aire del medio poroso es $1/3$ de la velocidad del aire por encima de las plantas. Así mismo, la ecuación de este mecanismo de transferencia de calor contiene el coeficiente de transferencia de calor convectivo, donde está basado en el número de Nusselt para porosidad media.

Luego del calor convectivo, se encuentra el calor latente o evapotranspiración, donde se considera la reducción de cargas de refrigeración en edificios, la modelación de plantas como medios porosos y la resistencia estomática. Estos autores, en comparación a todos los mencionados anteriormente, tienen la particularidad de incluir el modelo más reciente de techo verde SVAT (transferencia suelo-vegetación-atmósfera). En este modelo, se incluyen funciones empíricas que representan diferentes variables ambientales y vegetales como radiación solar, déficit de presión de vapor, contenido volumétrico de agua y la temperatura.

Sin embargo, como dicho modelo no estaba validado para el estudio traído a colación, entonces Tabares-Velasco & Srebric (2011) evaluaron con datos experimentales para las plantas *Sedum* *Spurium* y *Delosperma nubigenum* que son comúnmente usadas en los tejados vegetales todas las

funciones empíricas; que en total eran 9 funciones de radiación solar, 8 funciones de contenido de agua, 6 funciones de déficit de presión de vapor y 2 funciones de temperatura.

Para la validación del modelo SVAT, emplearon 6 conjuntos de datos de techos verdes con baja velocidad de aire y otros 6 con alta velocidad de aire, todo registrados por medio del “Cold Plate”. Con esto, hallaron que el valor mínimo de la resistencia estomatal de las plantas suele estar entre 500-700 s/m, lo cual para los autores está dentro del rango esperado que comprende desde los 405 s/m hasta los 1000 s/m para plantas suculentas.

Los modelos que mejor presentaron respuesta de los parámetros buscados fueron: 1. Combinación de la función solar, del contenido de agua, del déficit de presión de vapor (VPD) y de la función de temperatura; 2. El mismo caso anterior, pero modificando la función del contenido de agua; 3. Las funciones del caso 1, pero al igual modificando el contenido de agua; 4. Combinación de las funciones empíricas solar y VPD; 5. Combinación de funciones empíricas solar, del contenido de agua, VPD y temperatura por medio de un modelo mesoescala y 6. Combinación de funciones empíricas solar, contenido de agua, VPD y temperaturas por medio de otros estudios diferentes.

Una vez examinados tanto el modelo en ausencia de vegetación y el que tiene en cuenta la cobertura de las plantas, Tabares-Velasco & Srebric (2011) propusieron un balance que comprende los dos modelos antes descritos junto a la tasa de cobertura de fraccional vegetada (σ_f) que calcula la transferencia de calor a través del techo y la evapotranspiración total como se cita a continuación:

$$Q_{substrate} = \sigma_f Q_{substrate,covered} + (1 - \sigma_f) Q_{substrate,bare} \quad (\text{Ecuación 34})$$

$$Q_{ET,total} = \sigma_f (Q_{E,substrate,cov} + Q_{T,plants}) + (1 - \sigma_f) Q_{E,substrate,bare} \quad (\text{Ecuación 35})$$

Una vez desarrollaron el modelo con los balances expuestos para cada uno de los escenarios, los autores proceden con la verificación y validación de este con la finalidad de revisar si los modelos representan correctamente los diferentes fenómenos.

El prototipo “Cold Plate” se creó con el motivo de recolectar, por medio de instrumentos de medición, las variables necesarias para los procesos de transferencia de calor en la cubierta. En este prototipo, el cual estaba dentro de una cámara ambiental a escala real, se controlaban las condiciones ambientales exteriores como tasa de flujo de aire de la temperatura y la humedad. Dentro de las mediciones realizadas se encuentran: evapotranspiración, radiación de onda corta y onda larga entrante, radiación de onda larga saliente, flujos de calor, transferencia de calor convectivo, temperaturas en diferentes lugares del sustrato y de las plantas, conductividad térmica del sustrato, velocidad del aire, humedad relativa, reflectividad espectral y el índice de área foliar de modo manual. Todas estas mediciones se realizaron por medio del control de las variables que indican en una cubierta vegetal como radiación solar, humedad, velocidad del viento, temperatura, entre otras más, por medio de lámparas fluorescentes y diferentes instrumentos que controlan los factores medioambientales expuestos en un techo verde.

Entrando en contexto en la verificación y validación del estudio traído a colación, se resalta que dicha verificación fue hecha para evaluar la capacidad de que el modelo pudiese simular los fenómenos físicos que convergen en una cubierta vegetal y en principal la transferencia de calor y masa entre las plantas y el aire circundante. Para contrastar los datos producto de la simulación en paralelo con los obtenidos del “Cold Plate”, los autores requerían como entradas la temperatura, humedad relativa y velocidad del aire, temperatura del cielo, radiación solar entrante, contenido de agua en el medio de crecimiento, el índice de área foliar (LAI) y la temperatura del sustrato

inferior. Para el ingreso de la temperatura del cielo, esta fue determinada a partir de la temperatura del aire y la de la lámpara circundante instalada en el prototipo “Cold Plate”.

Luego de tener todas las entradas, procedieron a analizar la evapotranspiración, convección, conducción, temperatura del sustrato, temperatura de la superficie de la planta y la radiación neta. En el caso de la planta *Delosperma*, tuvieron un supuesto y que esta especie cuenta con distribución de ángulos foliares cónica, mientras que la planta *Sedum* supone una distribución horizontal del ángulo de la hoja horizontal. Entre tanto, obtuvieron que los valores de transmitancia para el escenario sin plantas son un 20% menores que en el caso de la cubierta con vegetación.

Entrando en detalle en los resultados de la evapotranspiración medida y calculada, tanto el modelo sin vegetación como el que posee esta, funcionan bien simulando el calor sensible (evapotranspiración), sin embargo, esta tasa es sobre simulada en los primeros días para la modelo sin plantas, mientras que el otro escenario de modelo subestima este proceso cuando las muestras contienen un valor de humedad considerable, lo que se traduce en una sobreestimación de la resistencia estomática (Tabares-Velasco & Srebric, 2011).

El error del cuadrado medio para el modelo de cubierta con plantas arrojó una evapotranspiración de 21 W/m^2 , mientras que en el caso de vegetación obtuvieron un calor sensible de 23.3 W/m^2 . En el caso del flujo de calor convectivo, obtienen unos valores de 23.6 y de 26.3 W/m^2 del error del cuadrado medio tanto para el modelo de cubierta verde experimentado con plantas y sin plantas, respectivamente.

En el mecanismo de transferencia de calor conductivo, se obtiene que el modelo tiene predicciones menores para el flujo de calor en el modelo sin plantas con valor del error del

cuadrado medio de 2.1 W/m^2 , en comparación con 4.3 W/m^2 para el caso de la simulación para la cubierta verde con plantas.

Las últimas validaciones realizadas por Tabares-Velasco & Srebric (2011), comprenden la temperatura de la superficie del sustrato y de las plantas, donde en general para ambos escenarios en los modelos analizados (con y sin vegetación), las estimaciones de temperatura son realmente cercanas a las que se registraron por medio de instrumentos de medición, más sin embargo, para la temperatura superficial de las plantas no se hallaron datos en el caso de la cubierta en ausencia de vegetación. Una variable que mencionan y que pudieron haber afectado un poco las predicciones de temperatura de la superficie del sustrato fue el albedo del medio de crecimiento, debido a que los autores no realizaron prueba de reflectividad espectral de las plantas.

Igualmente, los valores del error del cuadrado medio muestran resultados muy similares entre sí, tanto en el modelo con y sin vegetación, por lo que este modelo desarrollado es capaz de predecir con un grado considerable, por tanto, este mismo fue adaptado para el proyecto aquí tratado con tal de generar aproximación entre los datos medidos y los calculados, teniendo en cuenta las limitaciones del ingreso de variables de medición que no estaban al alcance por los altos costos de los equipos.

Otro apartado mencionado en esta sección por Tabares-Velasco & Srebric (2011) es que la predicción de las temperaturas del sustrato y de las plantas es de aproximadamente 2°C , sin embargo, para registrar la temperatura de la planta es sumamente complejo debido a que estas no tienen forma homogénea. No obstante, el error del cuadrado medio se halló entre los rangos esperados de temperatura registrados por la cámara de infrarrojos que se instaló en el “Cold Plate”.

Por otra parte, describen también que la energía solar es la variable con mayor incidencia en el modelo, en contraste con la humedad relativa que es la que menos relación tiene con las condiciones analizadas. Por el lado del LAI, estiman que es el factor que más significancia tiene en la reducción de la temperatura del sustrato y el flujo de calor a través de este, así como la transferencia de calor por convección y la evapotranspiración.

Entre tanto, el contenido de agua no generó tanto impacto en las reducciones de temperatura. Conjuntamente, los valores mínimos de la resistencia estomatal y coeficientes de extinción dependen de la selección de las plantas, donde con valores de 60 s/m para la resistencia estomática producen flujos de evapotranspiración entre 3 a 4 veces mayor que con los valores mínimos estomáticos para las suculentas. Sumado a esto, también refieren que el papel de la resistencia aerodinámica es menor o insignificante en la evapotranspiración. Aun así, no se debe descuidar el cálculo de esta debido a que impacta fuertemente en la transferencia de calor por convección.

Por último, concluyen que este modelo citado fue validado con datos experimentales en estado cuasi estacionario donde se consideran las transferencias de calor y masa entre el cielo, las plantas y el sustrato debido a que todos los flujos presentes en el sistema de cubierta verde están relacionados entre sí. En adición, encontraron que en el modelo de transferencia de calor presente en las plantas y el suelo generó diferencias menores al 10%, por lo que es recomendable aplicarlo con seguridad.

Para terminar, este modelo estima con precisión la transferencia de calor y masa a excepción de la subestimación de la tasa de evapotranspiración que puede estar sujeto a la resistencia estomática o al coeficiente de transferencia de calor y masa por convección empleado por esos mismos investigadores. Entre tanto, los diferentes factores ambientales que influyen en el desempeño térmico de una cubierta destacan que el de mayor influencia en los flujos de calor es

la radiación solar y el menos significativo es la humedad relativa. Además, el parámetro del LAI genera las mayores reducciones en los flujos de calor que pasan por la cubierta.

De igual forma, en la investigación de Ayata et al. (2011) llevaron a cabo una configuración experimental de laboratorio para crear diferentes condiciones ambientales y medir los flujos de calor sensible hacia/desde las cubiertas verdes. Además, en este estudio propusieron un “modelo básico”, para el cálculo de transferencia de calor por convección en los conjuntos de cubiertas verdes, que es una versión modificada de la ley de enfriamiento de Sir Newton, calibrada y luego validada con diferentes conjuntos de datos.

Es importante resaltar que, la distribución de la temperatura de la superficie no es homogénea en la hoja debido a que esta depende de muchos factores como la transferencia de calor sensible y latente, que constantemente van cambiando, dependiendo del dinamismo de los parámetros ambientales, que son las condiciones medioambientales en donde está expuesta la cubierta verde.

Por otra parte, la capa de vegetación se comporta como un atenuador de los flujos de calor en una cubierta verde. Este efecto debe tenerse en cuenta para la realización de los cálculos pertinentes de los flujos de calos sensibles (energía) y latente.

En el estudio de Ayata et al. (2011), se recogieron datos experimentales adicionales en el aparato de placa para incluir diferentes regímenes de flujo de aire. Además, la transferencia de calor por convección de una cubierta vegetal se examinó con diferentes modelos teóricos y se compararon las predicciones de dichos modelos. Estas simulaciones matemáticas teóricas y las predicciones se compararon con los datos medidos, lo cual es un buen indicio de contrastación de la formulación física de todas las condiciones simuladas para el Cold Plate.

Los datos experimentales utilizados se recopilaron a partir de varios experimentos dentro de una cámara ambiental. Por esta razón, se diseñó y después se construyó un aparato con la finalidad de medir importantes procesos de transferencia de calor y masa de calor en las cubiertas verdes.

El “Cold Plate” aparato experimental, se encuentra dentro de una cámara ambiental a escala real, donde se controlaban los parámetros ambientales como la temperatura y la humedad del aire. El banco de lámparas servía como una fuente de calor radiactivo. Por consiguiente, la cámara ambiental elimina la mayoría de los problemas de estado no estable que se encuentran en el campo de la experimentación y permite el uso de equipo de adquisición de laboratorio.

El aparato experimental consiste en una caja fuertemente aislada que contiene una muestra de techo verde. Una muestra de tejado vegetal mantiene en la parte inferior de la muestra de cubierta verde una temperatura inferior a la del aire circundante donde es considerado que esta disposición simula condiciones interiores más frías para edificios en verano.

Para la estimación del flujo de calor sensible, contaron con unas condiciones idealizadas las cuales no son directamente aplicables a las cubiertas verdes por que los métodos de cálculo recomendados suponen una similitud geométrica, por lo tanto, el estudio investigó si las ecuaciones disponibles para el cálculo de los flujos de calor sensible puede modificarse y utilizarse para la capa de vegetación, donde los fundamentos de los cálculos de los flujos de calor sensible puede encontrarse en la ley de enfriamiento de Newton.

Se debe agregar que, el cálculo del número para el flujo de calor convectivo sobre una placa rectangular a temperaturas uniformes en estado estacionario con flujo de aire laminar comprende la longitud característica para el número de Reynolds, donde se toma en consideración el área de la placa y su circunferencia. El valor crítico de Reynolds para la transición a la turbulencia en la

capa límite depende de la geometría de la superficie, la rugosidad de la superficie, la velocidad de la corriente libre, la temperatura de la superficie, el tipo de fluido y una serie de factores que no pueden definir fácilmente. Para el flujo sobre una placa plana, el valor generalmente aceptado el número de Reynolds crítico es $Re_{cr} 5 \times 10^5$ (Ayata et al., 2011).

Un valor más realista de Re_{cr} es 2×10^4 para vegetación basada en modelos de hojas planas y rectangulares. De esta, se han derivado expresiones semi-empíricas adimensionales para los flujos de las hojas en convección libre utilizando el número de Grashof.

Normalmente, los autores mencionan que una placa larga es suficiente para que el flujo se vuelva turbulento, pero no lo suficientemente larga como para dejar de lado la región de flujo laminar. En tales condiciones, el número Nusselt sobre la placa se determina teniendo en cuenta el número de Reynolds.

El método de McAdam's donde la convección forzada es resaltante sobre la convección libre y además si el tamaño de la hoja es pequeño, se propone esta relación, la cual es apta para superficies mayores a través de la siguiente ecuación:

$$h = 5,9 + 4,1 u \frac{511+294}{511+Ta} \quad (\text{Ecuación 36})$$

Donde u representa la velocidad del viento en m/s y la temperatura del aire sobre la superficie está representada por Ta .

Este método de McAdam's no sólo fue analizado por Ayata et al. (2011), sino que también se incluyó en la investigación de Quzada et al. (2020), donde en este análisis se consideraron las formulaciones matemáticas más relevantes para la transferencia de calor y masa en cubiertas ajardinadas a lo largo de 30 años. Una de las conclusiones ha sido observar por parte de los

investigadores una evolución en las modelizaciones de los techos ajardinados en lo que respecta a la transferencia de calor y de masa.

Esta fórmula fue empleada en el proyecto en cuestión únicamente para observar el resultado del valor del flujo de calor, más no se usó como tal en el desarrollo del modelo matemático de transferencia de calor tratados en este documento.

Para el cálculo del balance energético en un conjunto de cubiertas verdes, se debe tener en cuenta la radiación neta del cielo y el sol a la vegetación, el flujo de calor latente y sensible hacia/desde la capa de vegetación, y la conducción de calor en la capa del suelo.

La otra ecuación general citada por Ayata et al. (2011) proviene de otro estudio anterior por Deardoff (1978):

$$H = LAI * h (T_t - T_a) \quad (\text{Ecuación 37})$$

Esta forma modificada de la ley de enfriamiento de Newton ha sido utilizada por dos estudios anteriores. Este cálculo es para el flujo de calor sensible, donde es similar a la ecuación de Deardoff (1978) que al igual estimó esta misma tasa (calor por convección) en su investigación hallado por la siguiente ecuación:

$$H = 1.1 LAI - \rho_{af} * C_p * C_f * U_{af} * (T_l - T_{af}) \quad (\text{Ecuación 38})$$

En donde, ρ_{af} , es la densidad del aire en la proximidad del follaje [kg/m^3], C_p es el calor específico del aire a presión constante [$\text{J}/(\text{kg K})$], C_f es un coeficiente adimensional de transferencia de calor que tiene en cuenta ambos lados de la hoja, U_{af} es la velocidad media del viento que ventila en el follaje y promueve un débil flujo de calor y humedad de calor. Por último,

T_l es una temperatura representativa de la hoja y T_{af} es la temperatura media del aire dentro de la copa.

De este modo, con base en los modelos propuestos se encontraron valores aceptables de flujos de calor sensible al calcular dichos flujos con 16 valores de convección forzada y 10 de libre; obteniendo para estos regímenes de convección valores del error cuadrático medio de 18 y 23 W/m^2 respectivamente, lo que se considera valores buenos y aceptables al comparar los datos teóricos con las medidas experimentales y lo cual a su vez se logra evidenciar con los valores de R^2 los cuales corresponden a 0.73 y 0.71 para los regímenes de convección forzada y libre respectivamente.

Por otra parte, con respecto al contenido volumétrico de agua (VWC), esta variable disminuyó exponencialmente mientras que las velocidades del viento no afectaron dicho efecto y las cuales se limitaron a valores entre 0 y 3 m/s. Además, se encontró que la velocidad del viento en ese rango no afectó el flujo de calor sensible ni tampoco el latente, el cual se vio directamente afectado por el contenido volumétrico de agua. Comportamiento que no comparte el flujo de calor sensible, el cual, depende de los diferenciales de temperatura principalmente (entre la temperatura del follaje y de la interfaz follaje-aire).

Siguiendo con los resultados obtenidos, se encuentra una relación inversa entre el flujo de calor sensible y latente; donde, a mayores flujos de calor sensible, el flujo de calor latente disminuye equilibrando o estabilizando el flujo de calor total. De este modo, Ayata et al. (2011) desarrolla dos ecuaciones asociadas a los dos regímenes mencionados, teniendo en cuenta la relación inversa del contenido de agua volumétrica (VWC) con los flujos de calor sensibles y la relación directa entre estos con los diferenciales de temperatura.

Concluyendo a Ayata et al. (2011), obtienen para su propuesta basada en la ley de enfriamiento de Newton, un buen comportamiento, al calcular el menor valor del RMSE (6.6 W/m²) y el mayor de R² (0.90) lo cual define esta propuesta como la más válida teniendo en cuenta los valores más confiables. Finalmente, se postula la necesidad de utilizar el modelo en estudios experimentales in situ con el fin de lograr comprender su comportamiento para condiciones de velocidad del viento más reales cerca de la zona de interfaz follaje-aire.

.4. MARCO CONCEPTUAL

El sector de la construcción se encuentra dividida en dos grandes actividades principales, la edificación la cual se dedica a las soluciones de vivienda y las obras civiles de infraestructura, las cuales están conformadas por obras de carácter público y privado. Este sector es de los más importantes a nivel mundial ya que representa el 13 % del PIB mundial y en el caso particular de Colombia según (*Aporte Del Sector de La Construcción a La Economía Colombiana*, n.d.) es responsable de 1,8 millones de empleos y a lo largo de los últimos 15 años, debido al crecimiento en la construcción de vivienda (x6), ha logrado que la participación del valor agregado dentro del PIB se haya triplicado (CAMACOL, n.d.).

Al realizar un proceso constructivo de vivienda, existen diversas variables a considerar para lograr pasar de la parte operativa a la comercial siempre con el objetivo de satisfacer al cliente. Entre estas, el nivel de confort. Específicamente, el confort térmico que, aunque abarca diversos parámetros y consideraciones, alcanzarlo o poder aproximarse a los valores óptimos, le dará valor agregado al elemento constructivo y por lo tanto diferenciación en el nicho de mercado. Este corresponde a un factor asociado a cualquier proyecto de construcción.

Hoy día, los sistemas de refrigeración y calefacción representan cerca del 40% del uso total de la energía y más del 70% del uso eléctrico (Konkov, 2018). Entre tanto, la calefacción y refrigeración representa cerca de la mitad del consumo total de los edificios. Por ello, el sector constructivo ha desarrollado “edificios de alto rendimiento” los cuales combinan un bajo uso de la energía al igual que de las emisiones. Sin embargo, una de las tecnologías más novedosas en el mejoramiento del rendimiento energético son los tejados verdes, donde para el proyecto tratado se irán describiendo uno a uno los conceptos necesarios para la comprensión de la adaptación del modelo de transferencia de calor plantado, tal como se expresa a continuación:

.4.1. Aislamiento térmico

El aislamiento térmico está ligado o directamente relacionado a las condiciones de confort ya que depende de la variación entre las temperaturas externas e internas. Además, influye en los costos de una edificación pues permite acondicionar un hábitat al gusto del residente o usuario sin incluir o requerir de un costo significativo, cómo también influye en la humedad de las paredes de una habitación (es) (Piqueras, 2016).

Aspectos que tienen relación y determinan el diseño de un aislamiento térmico corresponden a temperatura, condiciones meteorológicas y consumo de energía. Teniendo en cuenta dichos parámetros se entiende cómo un aislante térmico, un cuerpo que posee un coeficiente de conductividad bajo (K). Existen más factores que aíslan el flujo o energía por calor adquirida por un cuerpo, pero para este caso, un aislante térmico vendrá a depender del cociente entre el espesor y la conductividad térmica, es decir de la resistencia térmica interna.

$$R = e/\lambda \quad w/m \cdot k \quad (\text{Ecuación 39})$$

El flujo de calor otro factor que se deberá tener en cuenta, el cual corresponde a la cantidad de energía calorífica que atraviesa un cuerpo en un tiempo determinado (una tasa).

$$\phi = Q/t \quad (\text{Ecuación 40})$$

Este posee una estrecha relación con el término densidad de flujo, el cual se define como la relación entre el flujo de calor y la unidad de superficie.

$$\varphi = \phi/S \quad (\text{Ecuación 41})$$

Se conocen tres tipos o categorías de materiales aislantes de acuerdo con (Kreith et al., 2011):

- Fibrosos: Partículas de filamentos de baja densidad con porosidad alta (-90%). Recomendados para protección térmica a T° entre 700 y 1700 °C.
- Celular: Materiales de celdas cerradas o abiertas con forma usualmente de tableros extendidos flexibles o rígidos. Son de baja densidad, capacidad térmica baja y resistencia a la compresión relativamente buena.
- Granular: Este aislamiento consiste en hojuelas o partículas pequeñas de materiales inorgánicos aglomerados en formas prefabricadas o utilizadas como polvos.

Estos materiales poseen conductividad térmica baja y actúan atrapando aire o cualquier gas dentro de las cavidades pequeñas en un sólido. Esta conductividad térmica es un valor efectivo que varía con la temperatura, la presión y las condiciones ambientales cómo por ejemplo la humedad.

El cambio de materiales y el cambio del espesor de estos, puede ocasionar un fenómeno denominado puente térmico el cual consiste en que un elemento con diferente conductividad térmica se interpone y por lo tanto ocasiona pérdidas de calor en invierno y ganancias en verano,

por ejemplo, lo que afecta el comportamiento del muro y por lo tanto las condiciones internas de confort. El concepto consta en un elemento que se interpone entre capas y permite el flujo de calor con mayor facilidad al interior o exterior de la edificación afectando directamente las condiciones de estabilidad térmica (Piqueras, 2016).

Con base en esto, se desprende un término relevante el cual corresponde a:

.4.2. Inercia térmica

Corresponde a una propiedad que poseen los materiales, la cual les permite almacenar calor durante el día con base a la incidencia de la radiación solar, para su posterior evacuación durante la noche. También se puede interpretar como la cantidad de calor que un elemento puede absorber de acuerdo con la radiación adquirida por parte del sol. La inercia térmica está relacionada a la temperatura del ambiente, la precipitación y la velocidad del viento. Además, se encuentra ligada a otras propiedades físicas específicas como la capacidad calorífica, densidad y espesor de cualquier elemento (Borges, 2018).

Se puede generalizar una relación la cual consiste en que, a mayor inercia térmica, mayor capacidad de acumular energía y esta, disminuye los intercambios de temperaturas con el exterior. Lo que ocasiona que durante el día exista un gran almacenamiento o adquisición de energía por medio de la cara más externa de la estructura para luego transmitir dicha energía a las capas subyacentes y permitiendo el paso del calor que no se puede retener a través de las capas, al interior de la vivienda (Piqueras, 2016).

De esta manera se añade que, según la relación entre el confort y el aislamiento térmico, se identifica la cubierta verde como alternativa de construcción sostenible, sus características y el proceso de transferencia de calor asociado. Para ello, se define inicialmente una cubierta verde como:

.4.3. Cubierta verde

Un sistema constructivo el cual le brinda a la sociedad la posibilidad de mantener un paisaje natural y verde de manera sostenible ya sea en un proyecto de construcción en curso o terminado. La implementación de este sistema aporta a la comunidad en términos ambientales, sociales, de salud y en ciertos casos dadas las características del proyecto, económicas (Secretaría distrital de ambiente de Bogotá, 2011). El hecho de implementar dicho sistema también puede influir en si un proyecto puede o no adquirir una certificación LEED, la cual le puede generar reducción de impuestos o reconocimientos a un proyecto constructivo. Del mismo modo, aumenta la durabilidad del techo hasta unos 60 años con una recuperación de la inversión en un lapso entre 8 y 21 años (*Beneficios de Una Cubierta Vegetal - Sempergreen, n.d.*).

Las cubiertas verdes pueden generarle valor a los predios sobre los cuales se construyen, cómo en el caso de (Boston) donde la instalación de una cubierta verde aumentó el valor de los apartamentos por unidad en unos 2.4 millones de dólares, generándoles un ingreso mensual por ahorro energético entre 300 y 500 USD. Además, a pesar de que hubo renovación en los contratos de arrendamiento, los residentes por conformidad con los resultados del proyecto y satisfacción por el impacto ambiental generado (ahorro energético y disminución de carga al sistema de alcantarillado) lo fueron pagando sin problema.

Por otro lado, (Breuning, 2014) en su análisis de costo-beneficio, proyecta el costo que un cliente debe asumir por la instalación de una cubierta verde con una duración de 40 años correspondiente a 33 USD/ft² incluyendo construcción y mantenimiento. Sumado a esto, se enuncia un ahorro potencial inicial para el cliente de 32 USD/ ft², lo que hace la inversión para una cubierta verde extensiva casi cero. Este ahorro corresponde a los costos asociados a la cubierta a

través de los 40 años lo que de ser atractivo o no, depende de la percepción del cliente y del nicho de mercado como tal.

En adición, para llevar a cabo un sistema adecuado de cubierta verde, será necesaria la adecuada integración entre el inmueble, la vegetación escogida, el sustrato escogido, los factores climáticos y ambientales. Para esto, el sistema deberá tener un desempeño óptimo y adecuado de los factores, estanqueidad, drenaje, capacidad de retención de agua, estabilidad mecánica, nutrición (ocasional) y filtración (Secretaria distrital de ambiente de Bogota, 2011). Según (Borges, 2018) las cubiertas verdes pueden clasificarse inicialmente en 3 categorías de acuerdo con la variación en los factores de diseño.

| | CUBIERTA EXTENSIVA | CUBIERTA SEMI-INTENSIVA | CUBIERTA INTENSIVA |
|------------------------------------|--|--|--|
| <i>ESPESOR SUSTRATO</i> | Mayor de 7 cm. (7-25cm) | De 10 a 25 cm. (10-100cm o más) | Mayor de 60 cm. (10-200cm o más) |
| <i>CAPA DE AISLAMIENTO</i> | Si | Si | Se puede prescindir de esta capa. |
| <i>TIPO DE VEGETACIÓN</i> | Plantas suculentas, herbáceas perennifolias, cespitosas y vivaces. | Plantas cespitosas, herbáceas perennifolias, vivaces, subarborescentes y arbustivas. | Plantas cespitosas, arbustivas y arbóreas. |
| <i>MANTENIMIENTO</i> | Bajo | Periódico | Continuo |
| <i>CARGA SUSTRATO Y VEGETACIÓN</i> | Baja | Media | Alta |
| <i>RIEGO Y NUTRICIÓN</i> | Por procesos natural. | Aporte periódico | Aporte regular |
| <i>CARGA TOTAL</i> | De 60 a 180 Kg/m ² ¹ | De 150 a 350 Kg/m ² ¹ | Mayor de 600 Kg/m ² ¹ |
| <i>COSTE APROXIMADO</i> | 70 - 90 €/m ² ² | 90 - 130 €/m ² ² | A partir de unos 150 €/m ² , según diseño. ² |

Ilustración 10 – Clasificaciones según el tipo de cubierta verde

Fuente: Borges, 2018

De acuerdo con el tipo de proyecto y las características de este, se deberá llevar a cabo un sistema constructivo respectivo. Para el caso de estudio, el sistema extensivo es el propuesto y consiste en:

.4.4. Cubierta verde extensiva

Un tipo de cubierta verde cuyo objetivo principal consiste en buscar, naturalizar el ambiente urbano, impactar positivamente y fomentar la mejora continua de las condiciones del medio ambiente y requerir o depender de la menor intervención humana posible.

Por tanto, para el diseño y construcción de esta se deberán considerar las capas respectivas a construir y considerar todo requerimiento estructural. Para la estructura deberá tenerse en cuenta las siguientes capas básicas identificadas en la literatura, aunque existen diversos modelos o combinaciones:



Ilustración 11 – Esquema de los componentes de un sistema típico de naturación en cubiertas verdes

Fuente: Garcia, 2010

A este tipo de cubierta verde se le atribuye el poco o mínimo mantenimiento dadas sus propiedades y plantas que posee. Cómo por ejemplo lo demuestra (Breuning, 2014), donde, del costo asociado a la inversión para la construcción del sistema de cubiertas verdes en el análisis costo-beneficio planteado, más de la mitad o 15 USD/ft² corresponde a mantenimiento pero a lo largo de 40 años lo que hace dicho costo casi despreciable.

Por otro lado, las plantas utilizadas en una cubierta verde extensiva deben ser de alta resistencia a condiciones extremas o desfavorables y son las que menos crecen entre las 3 categorías planteadas. Entre estas se conocen las ruderales las cuales corresponden a vegetación pequeña que crece en hábitats con alto flujo humano. *Sedum* tapizante recomendadas por (ZinCo Cubiertas Ecológicas, 2015) y la mayoría de proveedores nacionales.

| Lista de plantas sistema tipo "Sedum tapizante" | | | | |
|---|----------------|-------------|------------------|------------------|
| Plantas para grupos pequeños (grupos de 3, 5 o 7 plantas) | | | | |
| Nombre botánico | Nombre popular | Altura (cm) | Color flores | Mes de floración |
| <i>Sedum album</i> como especie p.ej., 'Coral Carpet', 'Murale' | Uva cana | 5-10 | blanco | 6-8 |
| | | 5-10 | blanco | 6-8 |
| | | 5-10 | rosa blanquecino | 6 |
| <i>Sedum cauticolum</i> | Pata de conejo | 10-15 | rosa | 8-9 |
| <i>Sedum floriferum</i> , 'Weihenstep. Gold' | Sedo | 10-15 | amarillo | 6-7 |
| <i>Sedum hybridum</i> , 'Immergrünchen' | Sedo mongólico | 10-15 | amarillo | 7-8 |
| <i>Sedum reflexum</i> | Tripmadam | 20-25 | amarillo | 6-7 |
| <i>Sedum sexangulare</i> | Sedohexagonal | 5-10 | amarillo | 6-7 |
| <i>Sedum spurium</i> | Sedo bastardo | | | |
| z. B. 'Album Superbum', 'Fuldaglut', 'Roseum Superbum', 'Splendens', 'Variegatum' | | 10-15 | blanco** | 7-8 |
| | | 10-15 | | 7-8 |
| | | 10-15 | | 7-8 |
| | | 10-15 | | 7-8 |
| | | 10-15 | | 7-8 |

** de poca floración

Ilustración 12 – Listado plantas tipo “*Sedum* Tapizante”

Fuente: ZinCo, 2015

Un estudio realizado por (Tan & Sia, 2005) donde la Junta de Desarrollo de Singapur llevó a cabo la construcción de módulos de cubierta verde sobre un área de más de 4000 m² con la finalidad de disminuir temperaturas presentadas al interior, efectos de reflexión de la luz y disminución efecto islas de calor con diferentes tipos de plantas para evaluar supervivencia teniendo en cuenta un nivel de precipitación anual de 2100 mm. En consecuencia, entre los resultados lograron determinar las plantas más recomendables para dichas condiciones, teniendo en cuenta que se trataba de una cubierta verde extensiva.

| | |
|---|--|
| Agavaceae | Convallariaceae |
| <i>Furcraea foetida</i> 'Mediopicta' | <i>Liriope muscari</i> |
| | |
| Aloaceae | Crassulaceae |
| <i>Aloe vera</i> | <i>Kelanthoe tomentosa</i> |
| | <i>Sedum acre</i> |
| | <i>Sedum mexicanum</i> |
| Aizoaceae | <i>Sedum nussbaumerianum</i> |
| <i>Aptenia cordifolia</i> | <i>Sedum sarmentosum</i> |
| <i>Carpobrotus edulis</i> | <i>Sedum sexangulare</i> |
| <i>Delosperma lineare</i> | |
| | |
| Amaryllidaceae | Liliaceae |
| <i>Zephyranthes candida</i> | <i>Ophiopogon intermedius</i> |
| <i>Zephyranthes rosea</i> | |
| | |
| Caprifoliaceae | Meliaceae |
| <i>Lonicera japonica</i> | <i>Aglaia odorata</i> |
| | |
| | Pandanaceae |
| Commelinaceae | <i>Pandanus amaryllifolius</i> |
| <i>Callisia repens</i> | |
| <i>Tradescantia pallida</i> 'Purpurea' | Portulacaceae |
| | <i>Portulaca grandiflora</i> cultivars |
| | |
| Dracaenaceae | Rubiaceae |
| <i>Sanseveria trifasciata</i> 'Hahnii' | <i>Ixora coccinea</i> |
| <i>Sanseveria trifasciata</i> 'Golden Hahnii' | <i>Murraya paniculata</i> |
| <i>Sanseveria trifasciata</i> 'Laurentii' | |

Ilustración 13 – Listado de plantas que prosperaron

Fuente: Tan & Sia, 2005

Paralelamente, una investigación realizada por (Viecco et al., 2018) en el Laboratorio LIVE ubicado en la Universidad Católica de Chile, donde se adecuó el espacio controlando temperatura y humedad a 20° y 50% respectivamente, con una velocidad de viento de 0.4 m/s². Se probaron 9 tipos diferentes de plantas identificadas en la Región Metropolitana de Chile cuyo clima es

semiárido, entre ellas *Sedum*, probando en una Cubierta verde GR y un jardín vertical (LW) a 3 escenarios de deposición de PM (Material Particulado), su comportamiento. Esto, con el fin de lograr determinar otro beneficio más para atribuirle a la implementación de GR y LW, debido a la poca investigación asociada a dicho efecto y poder definir qué tipo de planta se comporta mejor respecto a la captación del material particulado.

Finalmente, entre los resultados obtenidos, se determinó que el tipo de planta con la mayor captura de MP corresponde al *Sedum album*, seguido del *Sedum reflexum* con concentraciones por encima de 45.3% y 71.4% respectivamente. Y las que peor comportamiento poseen corresponden a *Lavandula angustifolia*, *Erigeron karvinskianus* y *Pitosporum tobira*.

.4.5. Cubierta verde extensiva según inclinación

Cabe resaltar que las cubiertas verdes extensivas se pueden clasificar según su inclinación en: planas, inclinada, de pendiente fuerte y casos especiales como lo representa (ZinCo, 2011).

| Pendiente del tejado: | | | | | | | | |
|--|---|-----|-----|---|-----|-----|---|------|
| Grados | 10° | 15° | 20° | 25° | 30° | 35° | 40° | 45° |
| Por ciento | 15% | 30% | | 45% | 60% | | 80% | 100% |
| Sistemas de estructuras para cubiertas planas (véase Guía de planificación para cubiertas ecológicas extensivas) | → | | | → | | | → | |
| | Sistemas de estructuras "cubierta ecológica inclinada" (véase pág. 4) | | | Sistemas de estructuras "Cubierta ecológica de pendiente fuerte" (véase pág. 8) | | | Soluciones especiales en coordinación con el departamento de ingeniería de ZinCo | |

Ilustración 14 – Tipo de sistema adecuado con la pendiente

Fuente: ZinCo, 2011

Conjuntamente, el hecho de que una cubierta verde extensiva sea inclinada genera la necesidad de desviar las fuerzas de empuje de la construcción del ajardinamiento que aumentan proporcionalmente con el grado de la pendiente, a contrafuertes sólidos o cualquier elemento estructural que reciba las cargas asociadas.

También hay que enfocar actividades dirigidas al control de la erosión, cómo también hay que seleccionar y plantar plantas especiales y acordes a la inclinación respectiva. Se debe llevar a cabo una buena impermeabilización, donde se garantice la resistencia contra raíces para garantizar el funcionamiento óptimo de la cubierta, teniendo en cuenta que para cubiertas inclinadas es sumamente difícil instalar láminas anti-raíces adicionales.



Ilustración 15 – Medidas de seguridad en función de la pendiente

Fuente: ZinCo, 2011

Algunos aspectos por considerar en cubiertas inclinadas es la incidencia de radiación solar y el escurrimiento de las precipitaciones, el cual es más rápido en comparación con cubiertas planas o de poca pendiente. Se debe considerar para evitar que huecos en la capa vegetal causen erosión, un sistema de riego provisional, el cual además será utilizado para épocas de sequía extrema. Otro

factor a tener en cuenta en este sistema corresponde a las fuerzas de empuje las cuales se debe planificar su desviación por medio de la implementación de barreras anti-empuje o soportes anti-empuje adicionales (ZinCo, 2011).

Continuando con los factores asociados al sector construcción, el proceso de transferencia de calor es fundamental por su influencia en las condiciones internas de las edificaciones y por la comodidad de los residentes. Este proceso se ve involucrado en cualquier interacción entre el ambiente y un elemento con propiedades conductivas y se define como:

.4.6. Transferencia de calor

La transferencia de energía que se genera sin un movimiento ordenado del sistema. Esta transferencia de energía no se genera por trabajo mecánico por lo que se caracteriza la energía involucrada como, energía calorífica. Esta se transmite comúnmente desde zonas de alta temperatura a zonas de baja temperatura, con el objetivo de alcanzar un estado de equilibrio térmico asociado a una distribución uniforme del comportamiento de temperaturas. De acuerdo con el tipo de proceso (reversible o irreversible) y con base a la transferencia de energía de este, se pueden tener dos escenarios, en los cuales varía si una sucesión de datos está o no en equilibrio (Domingo, 2011).

Para un proceso de transferencia de calor se deberá tener en cuenta la primera y segunda ley de la termodinámica donde para estas, se utilizará la primera para predecir las diferencias de energía almacenada en un volumen de control en un proceso de transferencia de calor por ejemplo mientras la segunda se utilizará para indicar la dirección del flujo de calor (Kreith et al. 2012).

Durante la transferencia de calor se pueden evidenciar 3 procesos que dan lugar al mismo, ya sea de manera individual o conjunta. Estos procesos en ciertos escenarios se encuentran presentes en conjunto, pero en otros uno(s) puede predominar en el proceso de transferencia de calor dejando a los otro(s) casi despreciables. Además, se encuentran relacionados a elementos como la humedad del aire, velocidad del viento y las condiciones de confort del ser humano. Según (Kreith et al., 2011).

Todo proceso ingenieril que requiere ser analizado desde la perspectiva de la transferencia de calor, requiere una respuesta cuantitativa para que tenga sentido, por lo que existen tres ecuaciones generales las cuales rigen los diversos mecanismos de flujo de calor. Estas tienen en cuenta ciertas leyes físicas y las relaciones que controlan los diversos mecanismos del flujo de calor y corresponden a:

.4.7. Radiación

Expresa la cantidad de energía que sale de una superficie en forma de calor radiante en función de la temperatura absoluta y de la naturaleza de la superficie (Kreith et al., 2011)

Así mismo, para el proceso de radiación, el físico Ludwig Boltzmann determina teóricamente la ecuación antes estipulada experimentalmente por Josef Stefan. Esta, considera un radiador perfecto o cuerpo negro el cual emite energía radiante desde la superficie a una rapidez neta de calor radiante transferido definida, la cual corresponde a:

$$qr = \sigma * A1 * (T_1^4 - T_2^4) \text{ (Ecuación 42)}$$

Para que ocurra un intercambio de energía entre dos cuerpos, debe existir entre estos una diferencia de temperatura y debe tenerse en cuenta que cualquier superficie de cuerpo negro a una temperatura superior al cero absoluto, radia calor a una rapidez proporcional a la cuarta potencia

de la temperatura absoluta en un área definida para una superficie (AI) y bajo el control de la constante dimensional de Stefan – Boltzman. (σ) (Kreith, 1970).

Además de este proceso, es necesario incluir en el cálculo de la radiación el concepto del método de las placas paralelas semi-infinitas por el cual se establece que las plantas corresponden a una única capa homogénea. También, se asume que, para el desarrollo del modelo, la cubierta verde está parcialmente poblada por la vegetación y que el área que impide la radiación es conocido como se describe a continuación:

.4.7.1. Cobertura Fraccional del Follaje

Está definido como por el porcentaje de la superficie de las hojas y los tallos de las plantas por toda la unidad de la superficie representado como “ S_f ”, es decir, la proporción del área total de la cubierta que se encuentra cubierta por el follaje. Este índice de cobertura puede variar de 0.25 a 0.5 para valor mínimo y de 0.5 a 0.95 para valores máximos (Konkov, 2018); y del mismo modo influye directamente en las transferencia de calor y humedad entre el follaje y el suelo. Además, es necesario conocer los valores de albedo como complementos del proceso de radiación y se describen como sigue:

.4.7.2. Albedo o Reflectividad

En una superficie el albedo se puede describir la reflectividad como la relación entre el total de la radiación solar saliente y el total de la radiación solar entrante en la superficie de la tierra.

En una superficie, la radiación incidente que no es absorbida se transmite o bien se refleja de regreso hacia el espacio hemisférico (Kreith et al., 2011). Este factor, es de gran consideración en la radiación debido a que controla la cantidad de energía disponible para generar los procesos de transferencia de la superficie durante el día (Schwarz, 2015). De manera similar, este valor se

puede usar para determinar la energía total disponible para la evaporación, el flujo de calor sensible y el intercambio de gases.

En el caso de las plantas, el albedo estará controlado por las propiedades ópticas de las hojas, la distribución angular de la cobertura vegetal y el índice de área foliar LAI; al mismo tiempo, se deben considerar las propiedades físicas del sustrato y el contenido de humedad y también las propiedades de reflexión de la vegetación y del medio de crecimiento (sustrato) del cultivo se expresan a través del albedo (Konkov, 2018).

De acuerdo con Schwarz (2015), para las especies de plantas *Sedum*, este valor se encuentra entre 0.13 y 0.18, mientras que en el suelo la reflectividad está comprendida entre 0.10 para un suelo seco y 0.35 para un suelo húmedo (Tabares-Velasco & Srebric, 2011).

Además de la tasa de cobertura fraccional del follaje y el albedo reflectividad, es necesario conocer la emisividad del suelo que se incluye en la radiación de onda larga generada desde el cielo a la superficie de la cubierta descrito a continuación:

.4.7.3. Emisividad

Es una propiedad de la radiación con alta importancia en este proceso. Se representa con la letra griega Épsilon ϵ y es definida como la radiación total dividida la radiación total que se emitirá por un cuerpo negro a la misma temperatura (Kreith et al., 2011). En el caso de que el cuerpo sea negro, este valor siempre será el máximo (1.0), sin embargo, para el proyecto en cuestión el valor de emisividad estará comprendido entre cero y la unidad.

De acuerdo con Tabares-Velasco & Srebric (2011) los valores típicos de un suelo están comprendidos entre 0.90 – 0.98 y además citan que esta propiedad no depende de manera directa del contenido de humedad del crecimiento analizado o sustrato.

Adicional a la cobertura fraccional del follaje, el albedo y la emisividad, también se debe tener en cuenta el índice de área foliar conocido como LAI (siglas en inglés) el cual es necesario determinar, pues este se incluye en la transmitancia de onda corta del follaje y se describe como sigue a continuación:

.4.7.4. Índice de Área Foliar

El índice de área foliar está definido como el área que ocupan las hojas de la cubierta verde de un lado por unidad de superficie de suelo (Konkov, 2018). En el caso de este autor, cita que se tomaron cien (100) hojas de la cubierta y a su vez se estableció que el área para estas era de 161.26cm^2 . Habría que mencionar, además, que Tabares Velasco (2009) plantea una definición similar comúnmente aplicada y tiene que ver con la superficie proyectada o superficie foliar en sombra dividida por la superficie del suelo.

Una vez establecidos estos conceptos necesarios para la radiación incidente proveniente del sol, se citan entonces, el proceso de convección o calor sensible junto a los diferentes flujos que intervienen en la cubierta verde y los índices o constantes necesarios en esta forma de representación de la transferencia de calor tal como se explica a continuación:

.4.8. Convección

Es un proceso de gran importancia en fluidos el cual es definido por Kreith (1970) cómo la rapidez de calor transferido por convección entre una superficie y un fluido. Este, depende principalmente del coeficiente de transferencia de calor de convección ($\bar{h}c$) el cual se considera difícil de determinar por lo complejo que es el fenómeno de convección. A través de los años se ha logrado asociar este coeficiente a la geometría de la superficie y de la velocidad, como también de las propiedades físicas del fluido y frecuentemente también a la diferencia de temperaturas.

A diferencia por ejemplo del coeficiente de conductividad (k), este varía en el tiempo, por lo que se aclara que existe un coeficiente local y uno promedio. Para muchas aplicaciones a nivel ingenieril, se prefieren los valores promedio los cuales van definidos de acuerdo con desarrollos prácticos en diferentes ámbitos de la ingeniería y se usan de modo estándar Kreith (1970). Por lo tanto, la relación originalmente expresada por Isaac Newton se considera más como una definición de la unidad de conductancia térmica promedio para la convección que una ley del fenómeno de convección y se define como:

$$qc = \bar{h}c * A * (Ts - T_{\infty}) \text{ (Ecuación 43)}$$

Dónde, la ecuación representa la rapidez de calor transferido por convección (qc) de acuerdo con su respectivo coeficiente de transferencia de calor convectivo ($\bar{h}c$) a través de un área determinada (A) y de acuerdo con la diferencia de temperaturas entre una superficie determinada (Ts) y un fluido (T_{∞}) el cual se encuentra en contacto con la misma.

.4.8.1. Calor específico del aire

Este concepto básico, pero a la vez fundamental para el proceso de transferencia de calor por convección, está definido como la energía requerida para elevar en un grado la temperatura de una unidad de masa de una sustancia (Cengel & Boles, 2012), donde en el caso del aire este valor corresponde a 1005.6 [J/Kg*K], es decir, que para el aire requiere de esta cantidad exacta de energía para incrementar un grado la temperatura de la misma. En termodinámica, existen dos conceptos fundamentales referentes a clases de calor específicos como lo es el *calor específico a volumen constante* y el *calor específico a presión constante*, pero debido a que el eje central de la investigación no comprende ninguno de los dos, estos no serán tratados de ninguna manera.

En la transferencia de calor convectiva que se genera por encima de la cubierta, donde se ha involucrado primeramente el calor específico del aire que se genera en el dosel de la cubierta vegetal, también se debe tener en cuenta una resistencia de la capa límite, descrita como:

.4.8.2. Resistencia aerodinámica

Esta resistencia se presenta entre la capa de vegetación y el sustrato, y de acuerdo con Tabares Velasco (2009) su cálculo se basa en la suposición de que las hojas son isométricas de forma de placas planas, cilindros o esferas de convección forzada laminar. No obstante, el hecho de emplear modelos laminares genera que el valor de la resistencia se halle de 1 a 3 s/m. Por otra parte, De La Cavada (1967) cita que la resistencia aerodinámica es la componente de la fuerza sobre el obstáculo en la dirección y sentido del viento relativo y tiene causas variadas como fricción, presión, onda, entre otras.

Desde otro punto de vista, esta resistencia se puede calcular por medio de la Ley de La Pared o el perfil logarítmico del viento en el cual se combinan funciones de estabilidad donde se comprenden los efectos de flotabilidad (Sailor, 2008). En el caso de un régimen de convección forzada (en esta convección, el fluido, es decir el aire, circula mediante medios externos), este valor de resistencia aerodinámica se calcula a través de una ecuación que comprende la altura de las mediciones del viento, humedad y temperatura, longitud de rugosidad que rige la transferencia de momento, de calor y momento, la constante de Von Karman que es igual a 0.41.

Por último, será necesario conocer la velocidad del viento a la altura del instrumento, donde a su vez será necesario estimar esta velocidad dentro de la capa de la planta, que de acuerdo con Konkov (2018) equivale al 30% de la velocidad del viento por encima de la plantas y a la vez, este autor cita una relación para estimar este valor (velocidad del viento aire-follaje) que tiene una relación con la densidad del follaje (tasa de cobertura fraccional del follaje).

Otra resistencia que hace parte del proceso del cálculo del calor sensible es la que se genera entre la capa de vegetación de plantas al flujo del viento es descrita como:

.4.8.3. Coeficiente de transferencia a granel

Este coeficiente de transferencia es una resistencia que generan las plantas de la cubierta verde al flujo de aire que circula a través de ellas, donde está determinado en función la longitud de la rugosidad de las plantas. En el escenario que se halle vegetación, dicha longitud de desplazará hacia arriba convirtiéndose en la altura de desplazamiento cero y tomando en consideración la altura de las plantas en metros.

De acuerdo con Konkov (2018), para el cálculo de este coeficiente en la superficie superior del follaje, se aplica un método semi-empírico el cual se compone de la constante de Von Karman (0,4), la altura del sensor de temperatura que comúnmente son dos (2) metros por defecto y de la longitud de la rugosidad de la vegetación que se comprende a su vez de la altura de las plantas en metros.

Por último, en el caso de determinar este coeficiente de transferencia cerca de la superficie del suelo, se debe considerar el número de Schmidt (0.63), la longitud de la rugosidad del medio de cultivo (0.001 m), la altura del sensor registrador de temperatura (2 m) y la altura de desplazamiento cero.

.4.8.4. Calor latente o evapotranspiración

Este proceso es una mezcla entre la pérdida de agua del suelo por evaporación y transpiración de las plantas. Esta transpiración se produce cuando el agua de la superficie de las hojas de las plantas se transporta a través del aire por difusión o convección. En los estomas es donde se genera la mayor parte de la pérdida de agua en las plantas, que son pequeños orificios ajustables en las hojas que permiten la entrada de los gases necesarios para la fotosíntesis (CO₂), como la liberación

de O₂ y vapor de agua. Es un mecanismo de control natural que permite a las plantas controlar su tasa de transpiración abriendo y cerrando sus estomas.

Por otro lado, para la evaporación del agua líquida en vapor de agua se requiere energía y, en este caso esta proviene principalmente del sol y de la capacidad del aire ambiente para absorber el vapor de agua. La fuerza impulsora de la evapotranspiración es la diferencia de presión de vapor, que debe ser menor que la presión de vapor interna de la planta para que ocurra la transpiración. Por consiguiente, el transporte del vapor de agua al aire se genera por medio de la convección, por lo que las principales características que inciden en este proceso serán la radiación solar, la temperatura y humedad del aire, la velocidad del viento.

Debido a que la velocidad del viento en el cálculo del calor latente es una ecuación empírica desarrollada por Penman (1948) la cual no comprende las fluctuaciones del día y la noche, las propiedades del dosel y las condiciones meteorológicas; se introdujo una resistencia aerodinámica y de superficie a la transferencia de calor y masa que se emplea para el cálculo de la evapotranspiración.

En el caso de que el medio de crecimiento se encuentre completamente cubierto por las plantas, se generaría una combinación entre todas las resistencias a la transferencia de calor de masa y calor de suelo, las resistencias internas de la planta y la capa límite del suelo y las hojas en dos resistencias en serie (resistencia de la superficie a granel y resistencia aerodinámica), mientras que si no está completamente cubierto el sustrato, deberá incluirse una resistencia para estimar la cantidad de evaporación del suelo.

Entre tanto, como complemento del proceso del calor latente, es necesario conocer la humedad relativa del aire, donde de acuerdo con Cengel & Boles (2012) este concepto se define como una relación entre la cantidad de humedad que el aire contiene respecto de la cantidad máxima que

puede contener a la misma temperatura, además, esta relación posee un efectivo directo en las condiciones de confort en un ambiente específico. Los valores de esta oscilan entre 0 para aire seco hasta 1 para aire saturado. Mas aún, esta cantidad de humedad que el aire puede llegar a contener depende de la temperatura, es decir, que dicha relación cambia de manera constante de acuerdo con la temperatura del ambiente.

Además de la transferencia de calor latente o evapotranspiración y las resistencias que este implica en el cálculo, existe una resistencia estomática que se presenta en el interior de la planta mencionada a continuación:

.4.8.5. Resistencia estomatal

Es la resistencia interna de la planta al flujo de vapor a través de la parte superior de la hoja y depende directamente del índice de área foliar (LAI), la radiación solar, la temperatura y la cantidad de agua disponible en la raíz de la planta Tabares-Velasco (2009). De acuerdo con (Allen et al. (2006) se incluyó un factor multiplicar de 0.5 en la ecuación de la resistencia estomática la hoja que expresa que sólo la mitad del dosel transpira de manera efectiva. Además, la única capa de las plantas que involucra el proceso de transpiración de manera significativa es sólo la capa de estomas en la superficie de la hoja. En cuanto a los parámetros o características de las cuales depende esta resistencia se encuentra el clima y la disponibilidad de agua, donde tienden a incrementar a medida que disminuye el contenido de agua en el suelo.

Comúnmente estos valores de resistencia estomatal se encuentran comprendidos entre 450-1000 s/m para plantas suculentas (Tabares Velasco, 2009), las cuales son las analizadas en el proyecto en cuestión, considerando que estos son los mayores valores registrados en la literatura.

Se debe agregar que también se hace necesario conocer otra variable involucrada en el proceso del calor latente, la cual corresponde a:

.4.8.6. Contenido volumétrico de agua

Está definido como la cantidad de agua presente en el medio del crecimiento de la cubierta vegetal y se puede estimar mediante la suma de la precipitación, el riego, la evapotranspiración y el agua de escorrentía (Konkov, 2018).

En un la Universidad de Oklahoma, Datta et al. (2018) definen el contenido volumétrico (VWC por sus siglas en inglés) como la relación que existe entre el volumen de agua y la unidad de volumen de suelo, es decir, que puede ser expresado como una relación, porcentaje o profundidad de agua por profundidad de suelo. Así mismo, citan un sencillo ejemplo en el que establecen que si el volumen de agua equivale al 20% de la unidad de volumen de suelo, el VWC podrá ser expresado como 0.20, 20% o 0.20 por 12 pulgadas por pie, lo que equivaldría a 2.4 pulgadas por pie de suelo.

.4.9. Conducción

Proceso de gran importancia en sólidos y de menor importancia en líquidos y gases, aunque los fluidos pueden generar conducción si están estáticos (aire). En este mecanismo de transferencia de calor, Jean-Baptiste Joseph Fourier define la relación básica para la transferencia de calor cómo la rapidez del flujo de calor por conducción:

$$qk = -k * A * \frac{dT}{dx}$$

(Ecuación 44)

Fourier define la rapidez de flujo por conducción en un material como una función de la conductividad térmica (k) del material por el cual se desarrolla el flujo de calor, área de la sección

(A) por la cual fluye el calor medida perpendicularmente a la dirección del flujo de calor y al gradiente de temperatura (dT/dx) en la sección o en otras palabras la rapidez y variación de la temperatura con respecto a la distancia en la dirección del flujo de calor (Kreith, 1970).

En este proceso de conducción ocurre una similitud entre los conceptos del cual corresponde a:

.4.9.1. Analogía entre flujo de calor y flujo eléctrico

Estos dos términos varían de un tipo de transferencia a otro, tomando principalmente los coeficientes para cada tipo de transferencia de calor, las constantes y el área por la cual se desarrolla el tipo de flujo a excepción de los diferenciales o “deltas” asociados a los mismos. Por lo que, de modo general para todos los casos asociados a transferencia de calor se presenta la relación entre Resistencia y Conductancia asociado a la teoría básica de la corriente directa para problemas asociados a transferencia de energía eléctrica con base en la analogía estipulada entre los flujos de calor y eléctrico:

$$R_i = \frac{1}{K_i}$$

(Ecuación 45)

Seguidamente, Kreith (1970) simplifica en la siguiente ecuación un sistema en el cual existen diversas capas interactuando al mismo tiempo donde, podría haber sin problema alguno, combinación de los tipos de transferencia de calor, eliminando las temperaturas intermedias del sistema y solo tomando las de frontera límite (ΔT_{total}), junto a la suma de las resistencias involucradas en el proceso de transferencia de calor ($\sum_{n=1}^{n=\infty} R_n$), ya sea en serie o en paralelo. A su vez, para este tipo de planteamiento, hay escenarios donde el dominio cuantitativo de una resistencia térmica permite tomarla como referencia para controlar el flujo de calor.

$$q = \frac{\Delta T_{total}}{\sum_{n=1}^{n=\infty} R_n}$$

(Ecuación 46)

Sin embargo, hay diversos escenarios dependiendo del problema analizado, en donde es conveniente simplificar esta ecuación combinando ya sea las resistencias o conductancias térmicas individuales de acuerdo cómo se haya planteado la solución del sistema térmico, en una sola cantidad la cual se le conoce como unidad de conductancia total o proporción de energía radiante total transmitida por el sistema o incluso, coeficiente total de transferencia de calor (U).

$$q = UA * \Delta T_{total}$$

(Ecuación 47)

$$UA = \frac{1}{\sum_{n=1}^{n=\infty} R_n}$$

(Ecuación 48)

Kreith (2011), por su parte considera régimen permanente como el flujo de calor a través de un sistema, el cual junto al gradiente de temperatura y el área de sección transversal a lo largo de la trayectoria del flujo, no varía en el tiempo o se considera uniforme. De acuerdo con esto, un método general para poder analizar diversos problemas de flujo de calor en estado estable a través de un sistema con estructuras compuestas; corresponde a analizar un flujo de calor aproximado de modo unidimensional.

En este análisis se considera el tratamiento del flujo de calor a través de resistencias térmicas en las fronteras y se considera principalmente un flujo de una zona o región de alta temperatura a una de baja temperatura respectivamente. Teniendo en cuenta lo anterior, se analiza el sistema

como un conjunto de paredes compuestas donde puede existir interacción entre los tipos de transferencia de calor. Además, para dicho análisis, es viable considerar el flujo de calor por unidad de área por practicidad y por la configuración del planteamiento realizado para el sistema multicapa analizado y se adiciona la consideración de despreciar todo flujo que sea muy pequeño como ocurre en algunos sistemas con la influencia de pequeñas capas de aire entre capas de mayor impacto térmico.

Una vez establecidos todos los conceptos involucrados en la formulación matemática del proceso de transferencia de calor, se procede a explicar aquellos que están relacionados con la estandarización del proceso junto con la optimización de este de la siguiente manera:

.4.10. Estandarización de procesos

El concepto de estandarización o normalización data desde 1980 por medio de la teoría de “puerta de paso” y es aquella que consiste en dividir el proceso en diferentes etapas y que a su vez cada una de estas requiere constatar la información necesaria antes de que el producto o servicio avance a la siguiente etapa (Boer, 2004). Por tanto, todas las actividades tendrán igual criterio de importancia sin que se genere el foco en el resultado final. La finalidad de generar la estandarización o normalización de un proceso es garantizar la calidad y reducir los tiempos.

De la misma manera, hoy en día han surgido módulos para aumentar la eficiencia y eficacia en cadena de suministro a fin de estandarizar las partes de los procesos. Dichos módulos son elaborados conceptos que busquen atravesar las barreras de la organización y, por tanto, la normalización es una herramienta fundamental en gestión organizacional.

Un modelo de estandarización ya existente es el de innovación de contingencia el cual contiene tres actividades: la resolución de problemas como proceso de aprendizaje, la difusión interna como

una constante comunicación y la adaptación organizativa la cual involucra que los colaboradores internos de las empresas puedan adecuarse a los cambios en los procesos, personas y demás (Boer, 2004).

Además, con base al modelo de estandarización, una simulación numérica podría ser útil para determinar el comportamiento de un proceso, específicamente del proceso de transferencia de calor donde los diversos factores mencionados previamente se verán relacionados desde la perspectiva de diseño, cualidades y desempeño térmicos.

.4.11. Simulación numérica no lineal

Los métodos de optimización no lineal han transcurrido con el pasar del tiempo y, aun así, aquellos procedimientos que se establecieron inicialmente todavía se siguen usando en la actualidad. Los métodos clásicos son el de Powell y Box los cuales están incluidos en ciertos paquetes de software de simuladores. El primero de estos es aquel que encuentra una solución óptima a nivel local, pero sólo se enfoca en problemas de optimización no restringidos (Armin Fügenschuh & Stegan N. Grösser, 2014). Este método inicia con una aproximación lineal de una solución óptima y en cada iteración, tiene por objetivo buscar un punto de mejora. Este método es aplicable a problemas pequeños que tengan entre 20 y 50 variables.

Los métodos actuales de Wächter, Biegler y Drud también involucran problemas de optimización restringida. Estos se basan la condición necesaria para la optimización lineal del problema con límites establecidos. Dichas condiciones generan un sistema de ecuaciones no lineal que suelen resolver diferentes iteraciones en procesos que convergen a cero, es decir, que, al ser un valor aproximadamente cercano al cero, se halla una solución óptima local.

Wächter y Biegler, implementaron el método conexo a un código de software a disposición pública (IPOPT). Estos autores, aplicaron estos métodos en problemas de gran magnitud que contienen hasta 250.000 variables y restricciones en los problemas.

Drud, también generó un código de software llamado CONOPT lo cual es más adecuado usarlo en optimización con estructura dinámica inherente.

El conjunto de todos los factores asociados previamente se puede, de cierta manera, complementar llevando a cabo una optimización financiera por medio del cálculo de la TIR a partir del VAN a través de la implementación de los diferentes modelos de optimización que existen actualmente como son el de interpolación, tantos y el más verídico, el de Newton Raphson.

.4.11.1. Modelo de optimización financiero

Un modelo de optimización financiero es aquel que permitirá evaluar las diferentes posibilidades y limitaciones (en cuanto a costo) de los procesos que integren la generación del desarrollo de un producto (Boer, 2004).

Los métodos de optimización financiera implican el uso de las herramientas financieras tal como Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR), los cuales son usados para analizar y evaluar los diferentes proyectos de inversión.

El VAN está definido como el Valor Presente Neto de los flujos de efectivos (diferencia entre ingresos y egresos) de cualquier proyecto que requiera una inversión (Mete, 2014). Por muy mínima que sea esta, se podrán aplicar estos dos conceptos para evaluar la alternativa del proyecto de inversión. Dicho en otras palabras, el VAN calculado representará el valor de los ingresos y egresos en el periodo inicial de un proyecto, pero si se desea calcular para otro periodo, la ecuación general de este deberá adaptarse de acuerdo con el momento exacto en que se esté analizando.

Por otra parte, el estudio de evaluación de un proyecto requiere a su vez de la determinación de la TIR, la cual está definida como aquella tasa de interés o descuento que hace que el VAN se vuelva cero. Por lo tanto, ambos conceptos están ligados, pues si se determina el valor presente, este deberá contener la respectiva tasa de interés o descuento.

Ahora bien, existen diferentes métodos de optimización financiero los cuales se enfocan en determinar la TIR a partir del VAN para su posterior aplicación. Los métodos son los siguientes:

Método de interpolación: Este primer método inicia con la imposición de dos tasas de interés (una mayor que la otra), de tal manera que se puedan obtener VAN para así ser graficados. Luego de obtener la gráfica, se escogen los valores que estén por encima y por debajo del punto de corte con el eje X para recalculer el VAN con esos valores y realizar una gráfica con los mismos para que así por medio de semejanza de triángulos de nueva TIR.

Método de tanteos: Este método consiste en generar tantas iteraciones de la tasa interna de retorno TIR como sea posible de modo que el VAN se convierta en cero. Es uno de los métodos más sencillos, pero no de tanta precisión como el siguiente a tratar (Newton Raphson).

Método de Newton Raphson: Esta última manera de calcular la TIR a partir de la ecuación de la VAN, parte de la fórmula propuesta por Newton Raphson donde incluye la derivada del valor presente actual, y asimismo poder reemplazar con los valores correspondientes y que de la misma manera que los procedimientos anteriores se generen iteraciones hasta encontrar la TIR que arroja el VAN de cero.

Luego de establecer las definiciones referentes al modelo de optimización financiero, se continuó con la instalación de los sensores de medición compatibles con el programa Arduino:

.4.12. Plataforma Arduino

Esta plataforma está definida de desarrollo completo tanto en hardware como en software, basada en un Microcontrolador, donde en el caso del proyecto en cuestión fue seleccionada la placa Arduino Uno como el circuito programado integrable. La finalidad de esta plataforma es ser usada en aplicaciones de computación física, donde el hardware o la placa contiene unas sencillas entradas y salidas analógicas y digitales que permiten la conexión de múltiples sensores y actuadores (Florez, 2013) como el sensor de temperatura DS18B20, el sensor de humedad de suelo capacitivo análogo, entre otros más usados en el desarrollo de esta tesis.

Entre tanto, el software de Arduino está basado en un entorno del lenguaje Processing proveniente a su vez del lenguaje de programación C. En resumidas cuentas, la plataforma es catalogada como un pequeño sistema computacional que permite ser programado con instrucciones por parte del usuario para interactuar con el entorno físico a través de diversas formas de entrada y salida.

La tarjeta Arduino permite que se puedan crear dispositivos para conocer las características del entorno que rodea a esta mediante el uso de múltiples dispositivos de entrada y salida como sensores, indicadores, pantallas, monitores y muchos más que pueden ser programados con interacciones exactas. Un claro ejemplo de esto se presenta en este proyecto donde se adaptó un sistema de medición muy preciso y con bajo costo como una de las características principales de esta plataforma, en el techo vegetal construido en la vivienda.

A través de los sensores instalados en la cubierta verde, se obtuvieron diferentes datos de temperatura y humedad en paralelo con los simulados donde se procedió a realizar un ajuste a la distribución:

.4.13. Distribución normal de probabilidad

Esta distribución es comúnmente conocida como “Campana” o Gauss, donde es simétrica respecto de la media, mostrando que los datos más próximos a la media tienen mayores frecuencias que los que se encuentran alejados (Chen, 2021).

Un ejemplo de gráfica de distribución normal de probabilidad con media conocida denominada con el término de μ y desviación estándar σ se presenta en la siguiente gráfica donde la media enfoca el centro total de la distribución y se puede decir que esta es simétrica alrededor de su media, lo que quiere decir que el área a la derecha de μ es igual a 0.5 y el área a la izquierda también es de 0.5

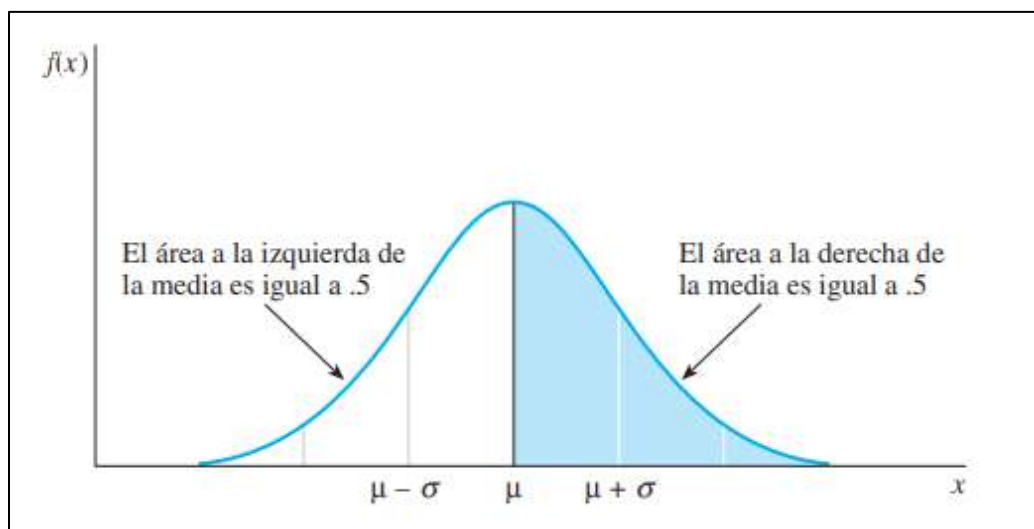


Ilustración 16 - Distribución normal de probabilidad

Fuente: (Menenhall et al., 2006)

En esta distribución, la cual tiene múltiples aplicaciones en la actualidad, Chen (2021) cita que para una desviación estándar de la media el 68% se encuentran en este rango, mientras que el 95% están dentro de más o menos dos desviaciones estándar y por último el 99.7% de los datos están dentro de más o menos tres desviaciones estándar, lo que a su vez a esto se le conoce como la regla

empírica que permite describir la variabilidad de un conjunto de datos apilados en la distribución referida (Menenhall et al., 2006).

.5. MARCO LEGAL.

El marco legal con el cual se rige o basa el desarrollo de las cubiertas verdes en Colombia fueron estipulados por el Concejo de Bogotá, Alcaldía de Bogotá, 2009 en donde se encuentra el Acuerdo de ley 418 de 2009 y Resolución 6619 de 2011, los cuales promueven el uso de cubiertas verdes, hacer uso de ellas y poder combatir de cierta manera el cambio ambiental de la mejor manera posible e igualmente, presenta la Guía Técnica de Techos Verdes, en la cual se plantean requerimientos y recomendaciones para llevar a cabo el desarrollo de las cubiertas verdes. Al igual que el Acuerdo 391 de 2009 el cual plantea una estrategia de gestión donde permita al ciudadano evaluar los problemas relacionados con la problemática ambiental y brinde soluciones a estos. Y finalmente la Resolución 6619 de 2011, donde se fomenta y plantea la implementación de jardines verticales, cómo una medida de avance o desarrollo de urbanismo sostenible (*Acuerdo 418 de 2009 Concejo de Bogotá D.C., n.d.*).

DISEÑO METODOLÓGICO

El desarrollo de la metodología del presente proyecto inició con definir el tipo de investigación a realizar y terminando con recolección de los datos proporcionados por la cubierta verde ya construida por medio de equipos compatibles con el software libre Arduino.

A continuación, se presenta un esquema del orden cronológico de toda la metodología llevada a cabo durante el desarrollo del proyecto:

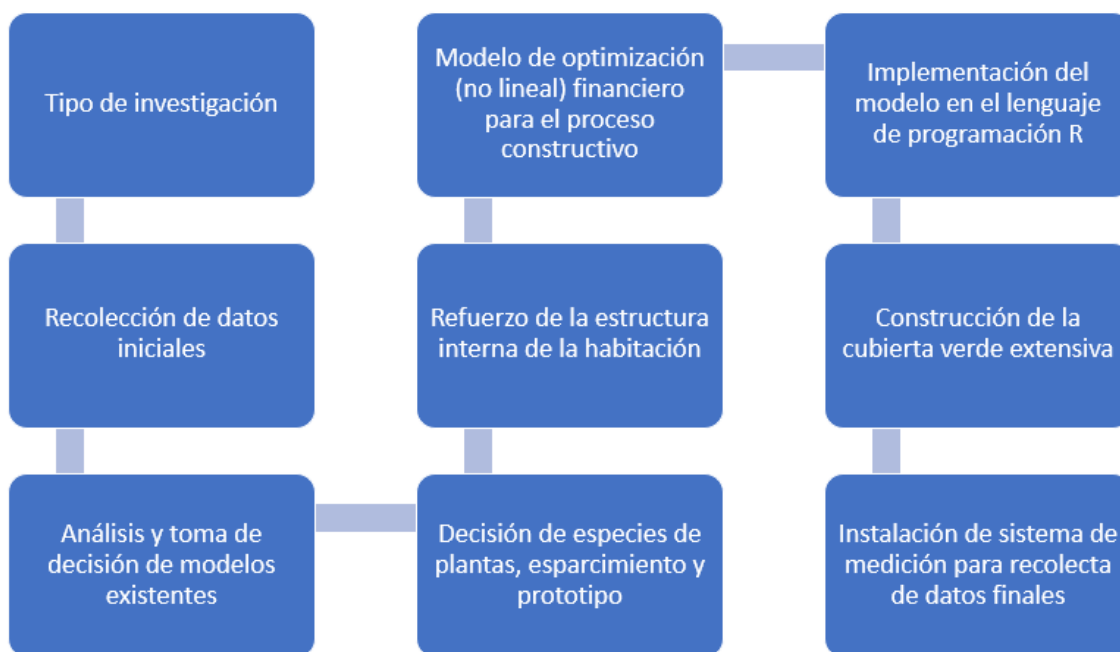


Ilustración 17 - Esquema del desarrollo cronológico de la investigación en cuestión

Fuente: Autores

.6. Tipo de investigación

En el proyecto en cuestión, se caracteriza por contar con una investigación de tipo experimental debido a que se pretende explicar la relación causa-efecto entre un número considerable de variables de entrada que requiere el modelo matemático adaptado al ambiente húmedo tropical y a las características de acuerdo a los materiales o diferentes procesos que se ven involucrados en los procesos subyacentes a las fases de transferencia de calor que se generan en la cubierta verde y como estos generan efecto alguno sobre la temperatura interna de la habitación.

.7. Recolección de datos iniciales

Debido a que el objeto principal del proyecto consistió en generar un diseño de una cubierta verde extensiva a través del modelado y simulación de las variables asociados a los procesos de transferencia de calor con la finalidad de lograr una reducción en la temperatura de la habitación principal de una vivienda ubicada en el área metropolitana de Bucaramanga, se optó por adquirir dos (2) termómetros de la marca Elitech GPS-6 en los meses de febrero del año 2020 los cuales cuentan con la función de registro de temperaturas y humedades ambientes por intervalos de tiempo previamente establecidos.

Para este caso se programaron registros por hora de las dos variables tanto del exterior de la cubierta de la habitación objeto de estudio como del interior de esta, sin embargo, el dato de humedad proporcionado por el sensor del datalogger es despreciable en este caso por ser una medida del ambiente en general.

Uno de estos dispositivos de medición fue instalado a escasos 10cm de la teja donde estaría ubicada la futura cubierta verde extensiva, mientras que el otro se situó en el interior de la habitación objeto, donde la finalidad de ambos sensores era identificar o analizar las fluctuaciones

de temperatura presentadas dentro y fuera de la habitación principal y en especial la determinación de los máximos y mínimos de esta misma variable junto con el promedio los cuales a su vez serían usados en las simulaciones de los modelos, pues éstos requieren como variables de ingreso estas temperaturas y otras variables.

Tiempo después de registrar datos, se continuó con el almacenamiento y la gráfica de estos para observar el comportamiento tanto en la superficie de las tejas de arcilla de gres sin cubierta verde como en el interior de la habitación, donde se obtuvo la temperatura para el mes como se muestra en las siguientes gráficas:

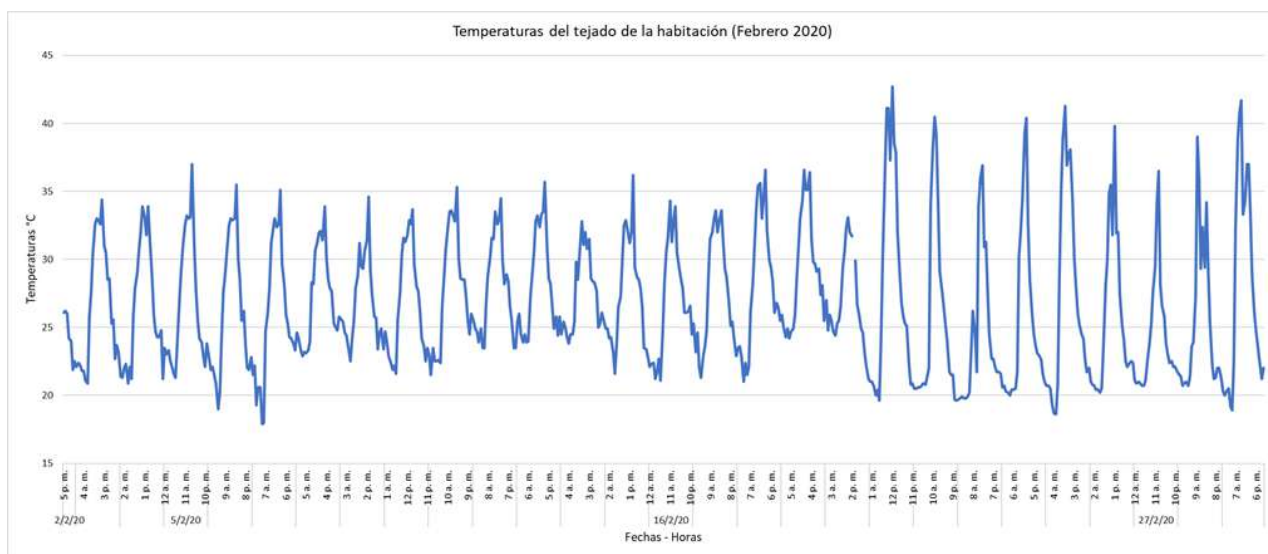


Ilustración 18 - Temperaturas externas (teja arcilla) mes febrero 2020

Fuente: Autores

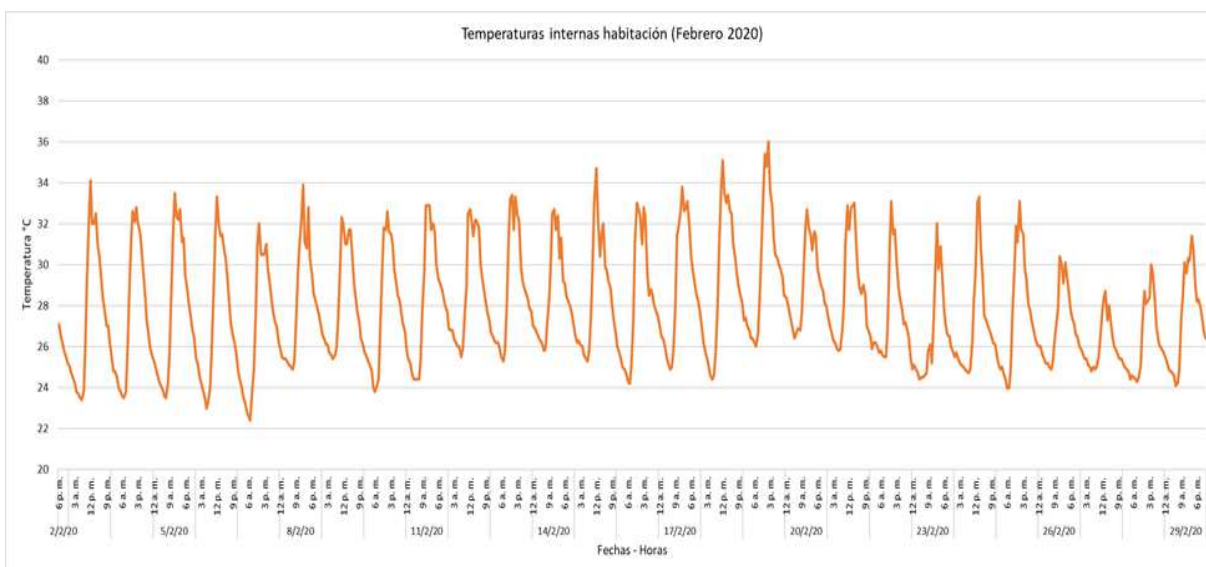


Ilustración 19 - Temperaturas internas habitación mes febrero 2020

Fuente: Autores

En el escenario presentado en la **ilustración 18** se observa que los registros de temperatura de la teja del cuarto están comprendidos desde los 20°C hasta los 40°C, incluso hay datos que llegan a exceder estos límites en ciertas ocasiones, mientras que para las temperaturas en el interior del cuarto se comprenden desde los 24°C hasta los 33°C de acuerdo con lo que se observa en la ilustración anterior, lo que deja en claro que las fluctuaciones presentadas tanto en el exterior como en el interior de la casa tienen altos rangos lo que genera en los residentes una sensación de confort poco agradable, más aún cuando la máxima temperatura presentada en el interior es de 36°C, valores los cuales se esperarían reducir con la implementación de la cubierta verde. [Para observar las gráficas de los registros de temperatura de febrero, marzo y abril por individual tanto del cuarto como del tejado dirigirse desde el Anexo 13 hasta el Anexo 18].

Es de resaltar que los datos solo se tuvieron desde febrero hasta abril, debido a que en principios de junio del 2020 un termómetro ubicado en el exterior, sufrió un daño asociado a la lluvia y al efecto de capilaridad a través del cable de medición lo cual pudo dañar el sistema del mismo

ocasionando que no encendiera más, mientras que el otro sensor no fue posible descargar los datos después de este tiempo por un defecto en el instrumento, por tal razón se optó por investigar acerca de un sistema de medición económico y viable como se presenta en la sección 6.8 del presente documento.

En la siguiente ilustración se observa cómo fue instalado el sensor del exterior del cuarto para una mayor claridad:



Ilustración 20 – *Instalación termómetro en el techo de la habitación*

Fuente: Autores

Estos datos fueron analizados e insertados en el modelo de transferencia de calor explicado más adelante y también sirvieron como objeto de estudio al comparar los mismos una vez estuviese construida la cubierta verde extensiva.

El día 20 de febrero se presentó un cambio en el registro de los datos en el transcurso de la tarde con el dispositivo de medición instalado en el tejado de la cubierta existente, tal como se

puede apreciar en la *ilustración 18* debido a que el termómetro se instaló directamente encima de la teja de arcilla como se representa en la *ilustración 20*.

Por último, se solicitaron los registros medidos por la estación meteorológica disponibles en el Instituto Colombiano de Petróleos (ICP) ubicado en Piedecuesta, Santander debido a que por medidas de prevención de salud no estaba permitido el ingreso a la UPB seccional Bucaramanga para recolectar los datos de los meses de febrero, marzo y abril los cuales serían comparados entre sí, por medio de los registros recolectados con los termómetros en el interior de la habitación y a escasos 10 cm de la teja del techo tal como se aprecia en la *ilustración 20*.

La finalidad de esto se basó en determinación de los valores críticos (máximas o más representativas) donde se definiría a qué horas específicas se registran las medidas extremas para los escenarios propuestos de la cubierta en servicio y cubierta verde extensiva durante el tiempo de la investigación tal como se presenta a manera de resumen en la siguiente ilustración:

| FEBRERO | | | |
|-----------------------------|---------------------------------------|--|--|
| Modo obtención datos/Rangos | Estación meteorologica ICP (ambiente) | Termómetro elitech (Teja de la cubierta) | Termómetro elitech /Arduino (Interior) |
| T°C máxima | 31,9 | 42,7 | 36,0 |
| Fecha | 19/02/2020 | 22/02/2020 | 19/02/2020 |
| Hora | 1:00 p. m. | 12:58 p. m. | 14:01:40 p. m. |
| T°C mínima | 18,8 | 17,9 | 22,4 |
| Fecha | 6:00 a. m. | 5:58 a. m. | 7:01 a. m. |
| Hora | 6/02/2020 | 7/02/2020 | 7/02/2020 |
| MARZO | | | |
| Modo obtención datos/Rangos | Estación meteorologica ICP (ambiente) | Termómetro elitech (Teja de la cubierta) | Termómetro elitech /Arduino (Interior) |
| T°C máxima | 31,9 | 48,6 | 34,5 |
| Fecha | 5/03/2020 | 5/03/2020 | 9/03/2020 |
| Hora | 12:00 p. m. | 11:08 a. m. | 12:01 a. m. |
| T°C mínima | 18,0 | 16,4 | 22,9 |
| Fecha | 22/03/2020 | 22/03/2020 | 22/03/2020 |
| Hora | 5:00 a. m. | 5:08 a. m. | 6:01 a. m. |
| ABRIL | | | |
| Modo obtención datos/Rangos | Estación meteorologica ICP (ambiente) | Termómetro elitech (Teja de la cubierta) | Termómetro elitech /Arduino (Interior) |
| T°C máxima | 29,10 | 49,00 | 34,70 |
| Fecha | 26/04/2020 | 2/04/2020 | 10/04/2020 |
| Hora | 2:00 p. m. | 5:08 a. m. | 11:01 a. m. |
| T°C mínima | 18,70 | 19,00 | 22,40 |
| Fecha | 22/04/2020 | 3/04/2020 | 20/04/2020 |
| Hora | 3:00 a. m. | 10:08 a. m. | 5:01 a. m. |

Ilustración 21 - Tabla resumen temperaturas críticas ambientes, exterior e interior meses febrero, marzo y abril 2020

Fuente: Autores

.8. Análisis y toma de decisión de modelos existentes

.8.1. Consideraciones generales del proceso de transferencia de calor

El modelo de transferencia de calor para una cubierta verde extensiva tiene como objetivo representar analíticamente variables físicas asociadas a la transferencia de energía que existe en un sistema cuasi-estacionario. Estas variables físicas, corresponden a ciertos input o entradas del modelo, las cuales, para el caso de estudio, fueron calculadas analíticamente por medio de la

implementación de ecuaciones empíricas propuestas por diversos autores a base de experimentación.

El sistema de unidades empleado corresponde al sistema internacional (S.I.), ya que estas ecuaciones en su mayoría fueron propuestas y calibradas en ciertos estudios con base en dicho sistema métrico. Por lo tanto, para generalizar la congruencia dimensional a través de la decisión, aplicación y análisis del modelo de transferencia de calor, se consideró para cualquier flujo de calor manejar las unidades W/m^2 .

Por otro lado, existen también entradas medidas experimentalmente, para facilitar la implementación del modelo, por medio de equipos comerciales calibrados como lo son, termómetros, termocuplas y sensores de humedad como lo son termómetros DS1820, termocuplas Max 6675 y sensores de humedad de suelo módulo HI-69.

Las variables físicas que se contemplan en el modelo de transferencia de calor o de energía, se expondrán en detalle más adelante, pero es importante resaltar, lo relacionadas que se encuentran estas variables entre los autores de referencia escogidos para esta investigación. Pues, aunque haya diversos modelos que han sido implementados por diferentes autores, la estructura de las ecuaciones es muy similar, ya que se han desarrollado con base en los conceptos básicos de transferencia de calor. Los cuales se encuentran directamente relacionados con la termodinámica clásica (Kreith, 1970).

Esta, posee limitaciones pues se basa en análisis termodinámico y no en el de transferencia de calor, por lo que estudia los estados de diferentes sistemas desde el punto de vista macroscópico (Kreith et al., 2011). Lo que evidencia una tendencia principalmente dirigida al estudio de los estados de equilibrio mientras que la transferencia de calor busca determinar la tasa de

transferencia de calor para un diferencial de temperatura especificada. Por lo tanto, la transferencia de calor desde el punto de vista de la ingeniería como lo define (Kreith et al., 2011) es clave para lograr determinar la tasa de transferencia de calor para una diferencia de temperatura identificada lo que aplica al caso de estudio.

De esta manera, el análisis cuantitativo de los tres modos de transmisión de calor o los tres tipos de transferencia de calor (como suelen llamarse comúnmente), radiación, convección y conducción es necesario junto con el análisis de las leyes físicas, para representar el proceso de transferencia de calor en un sistema o caso ingenieril. Por lo tanto, la consideración de relaciones básicas para los tipos de transferencia de calor permitió establecerlos en términos de rapidez de flujo de calor por radiación, convección y conducción respectivamente (Kreith, 1970).

En diversos problemas de ingeniería, los tipos de transferencia de calor se encuentran relacionados entre sí, por lo que una solución común para tales problemas puede simplificarse usando para los tipos de transferencia de calor, una conductancia o resistencia térmica, con el fin de analizar sistemas térmicos en el que ocurren varios modos o tipos de transferencia de calor simultáneamente; ya sea través de secciones conectadas en serie o mecanismos en paralelo, como suele ocurrir para la transferencia de calor para una sección definida de un sistema a nivel práctico o cercano a la realidad (Kreith, 1970).

Para el presente caso de estudio, se llevó a cabo esta consideración en la sección final del modelo donde fue necesario, por practicidad, considerar un **régimen permanente** con el fin de determinar un flujo de calor a través de la estructura, el cual junto al gradiente de temperatura y el área de sección transversal a lo largo de la trayectoria del flujo, no varía en el tiempo o se considera uniforme.

Seguidamente, la consideración de un sistema de estructuras compuestas fue fundamental en la sección inferior de la estructura. Principalmente en la sección donde se llevó a cabo el análisis asociado al proceso de conducción, ya que se tuvo en cuenta que de entrada se conocen las capas que interactúan entre sí en el sistema (cubierta verde) junto a sus propiedades térmicas; exactamente el valor del coeficiente de conductividad para cada material y una temperatura frontera límite (Temperatura del sustrato).

Por lo tanto, se consideró un sistema de transferencia de calor en serie para determinar el coeficiente total de transferencia de calor por conducción y de esta manera lograr finalmente determinar con la asunción de, un flujo de calor en estado estable a través de estructuras compuestas, la temperatura de la habitación del caso de estudio teniendo en cuenta para dicha asunción, la interacción entre el proceso de transferencia de calor por conducción existente en las diversas capas que componen la estructura y convección al considerar presencia del aire en condiciones de convección libre.

El análisis y toma de decisión del desarrollo para el tipo de transferencia de calor, conducción; fue diseñado de acuerdo con Kreith (1970), ya que algunos autores no proponen el desarrollo cuantitativo de este proceso como ocurre en el caso de diversos autores donde logran medir el valor del flujo por medio de fluxómetros o medidores de flujo, lo que para el presente caso de estudio no fue posible.

Para los otros dos tipos principales de transferencia de calor (convección y radiación) se buscó congruencia dimensional y similitud en la estructura de las ecuaciones, ya que los autores han partido de los planteamientos teóricos realizados por Kreith (1970) y han desarrollado diversas ecuaciones empíricas que representan cada fenómeno, pero contienen a su vez, variables físicas adicionales las cuales están directamente asociadas a la presencia de una cubierta verde en un

sistema de techo o en algunos casos a la interacción entre los sistemas, vegetación, un suelo determinado y diversas variables meteorológicas.

Estas corresponden a, radiación solar, velocidad del viento, temperatura ambiente, precipitación y presión atmosférica para el caso de estudio, respetando los parámetros estipulados por el sistema internacional de unidades (S.I.) con el fin de garantizar congruencia dimensional en el desarrollo de este.

.8.2. Selección del modelo de transferencia de calor

Para la selección del modelo, y el análisis de los tipos de transferencia de calor, se investigó acerca de los **modelos mecánicos y analíticos** más comunes y que hayan sido validados hasta la fecha y los cuales hayan sido citados o implementados para investigaciones relacionadas con el desarrollo de una cubierta verde extensiva. Estos modelos se definieron como dimensionalmente congruentes y a su vez fueron estudiados para el presente caso de estudio bajo los conceptos y parámetros básicos de transferencia de calor desarrollados por Kreith (1970) y Kreith et al. (2011).

Con base en esto, existen modelos de transferencia de calor que inicialmente no fueron desarrollados para este tipo de investigación, como por ejemplo lo es el modelo FASST (Fast All-Season Soil Strength) el cual fue desarrollado por Frankenstein & Koenig (2004b) para el cuerpo ingenieril de la armada de los Estados Unidos y específicamente para el programa de investigación BTRA (Army's Battlespace Terrain Reasoning and Awareness), con el fin de estimar la resistencia que tiene un suelo determinado, pero el cual es apto para el análisis del comportamiento térmico de una cubierta verde ya que el balance de energía para los sistemas de follaje o capa vegetal y el suelo o sustrato, están desarrollados asumiendo un intercambio de calor o energía de estado estacionario o cuasi-estacionario entre estos dos sistemas.

Con este modelo, Frankenstein & Koenig (2004b) plantea la consideración de un balance de energía unidimensional de estado dinámico del suelo con el fin de predecir el estado del suelo, en términos de paso vehicular, militar e incluso peatonal. Esto, teniendo en cuenta factores importantes como el contenido de humedad, el contenido de hielo, la temperatura, y los perfiles de congelamiento y derretimiento, así como la resistencia del suelo y la acumulación o el agotamiento de la nieve, los cuales para el caso de estudio no son aplicables o al menos no se consideran teniendo en cuenta la ubicación geográfica de la edificación.

El planteamiento de este modelo tuvo en cuenta que no había series de datos disponibles de mediciones del gradiente de temperatura sobre el follaje y el suelo. Por lo tanto, la información usada junto a los parámetros asociados al tipo de suelo (SM = arena limosa) y el tipo de vegetación (Pasto alto) fueron extraídos de la literatura por defecto, pero variando a criterio la densidad de la vegetación. Esto, junto a la consideración por ejemplo de congelamiento o hielo en el sistema, fueron de los factores más determinantes para descartar este modelo ya que propone de manera general ciertas variables físicas las cuales a criterio se definieron como medibles o cuantificables, a diferencia de escogerlas a criterio Frankenstein & Koenig (2004b).

Esto ocurre por ejemplo al momento de determinar las variables de Índice de Área Foliar (LAI) y Cobertura Fraccional del Follaje (Sf), donde se manejan valores teóricos muy valiosos pero muy estándar, de acuerdo con diversas configuraciones de vegetación los cuales propone Dickinson et al. (1986). A su vez, propone relaciones para el cálculo de la Cobertura Fraccional del follaje (S) teniendo en cuenta la presencia de estaciones climatológicas lo cual para el caso de estudio se omite estrictamente.

Lo mismo ocurre con (Ramírez & Senarath, 2000) , quien considera para poder determinar un valor de Cobertura Fraccional del Follaje aproximado, la implicación de factores que varían de acuerdo con la configuración del suelo y los cuales no coinciden con la configuración del follaje empleado en la construcción de la cubierta verde extensiva del presente estudio o al menos se consideran muy generales.

Independiente a estas consideraciones y a la razón del desarrollo y aplicación de este modelo, el balance de energía asociado al follaje y al suelo maneja una estructura aceptada por los autores de acuerdo con lo evidenciado en la literatura pues considera los tipos de transferencia de calor de modo acertado y respeta la congruencia dimensional asociada al Sistema Internacional (S.I.). Por ejemplo, en el siguiente esquema, se logra apreciar los tipos de transferencia de calor asociados a un sistema de múltiples capas donde existen las interfaces (suelo -aire o suelo-nieve; nieve-aire) usando datos de entrada meteorológicos o incluso medidos in situ (Frankenstein & Koenig, 2004b).

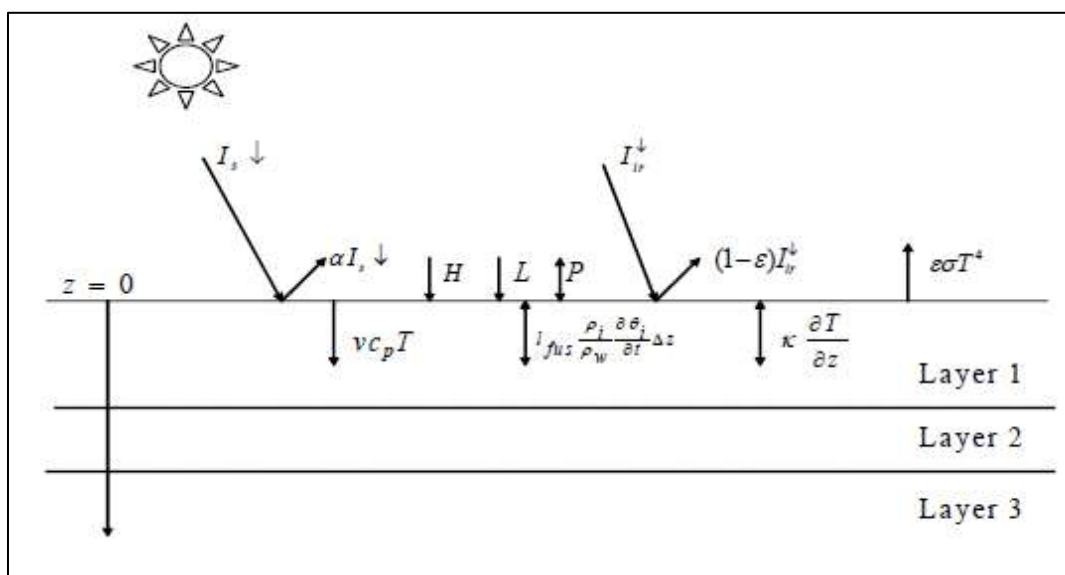


Ilustración 22 - Balance de energía del suelo

Fuente: (Frankenstein & Koenig, 2004a)

Como se evidencia en la *ilustración 22* y en la Ecuación 27, se consideran los dos tipos de radiación asociados a un sistema multicapa de cubierta verde, radiación de onda corta (I_s) y larga (I_{lrr}). Cabe resaltar que Frankenstein & Koenig (2004a) aclara la importancia de considerar la inclinación de la superficie receptora de la radiación de onda corta lo que para el presente caso de estudio se omite en todos los modelos planteados, pero se busca indagar a profundidad este efecto para futuros estudios y mejor entendimiento de los conceptos asociados al proceso de transferencia de calor en una cubierta verde extensiva.

Por otra parte, se evidencian los tipos de flujo de calor convectivo, calor latente (L) asociado al proceso de evapotranspiración y sensible (H) asociado al aire circundante al follaje, junto al efecto de movimiento de agua asociado explícitamente a la precipitación (P). A su vez el efecto de la conductividad en las capas inferiores del sistema con la relación al gradiente de temperatura a través del sustrato en términos del espesor de las capas en cuestión Z (Capas 1, 2 y 3).

También se resalta un último término que representa el calor que se aleja o se acerca a la superficie debido al movimiento vertical de la humedad ($v * C_p * T$). Este, requiere atención para futuros estudios ya que no se le encontró congruencia dimensional, lo que se asocia estrictamente a falta de conocimientos por parte de los autores sobre los términos asociados a la expresión, especialmente a “ v ” el cual según Frankenstein & Koenig (2004b) corresponde a la cantidad de agua que fluye hacia o desde la superficie del suelo.

Para el balance de energía del follaje (Ecuación 25) se consideran los mismos términos ya mencionados pero asociados al tipo de vegetación empleada, el o los cuales varían de acuerdo con el Índice de Área Foliar (LAI) y Cobertura Fraccional de Follaje (S_f). Se omite el proceso de conducción ya que no es relevante dado el sistema y sus parámetros físicos definidos.

De este modo, el balance tiene un símil a excepción principalmente de, la dirección de flujo de la radiación de onda larga la cual es generada al considerar un modelo de estado estacionario de placas paralelas semi-infinitas (Frankenstein & Koenig, 2004b) y de la radiación recibida por el follaje y el suelo.

Esto último diferencia en cierto modo ambos balances de energía ya que para el follaje se considera que la radiación es recibida en toda la Cobertura Fraccional de Follaje (S_f) o en otras palabras en toda la sección de la estructura (cubierta verde) que cuente con vegetación, mientras que, para el suelo o sustrato, solo se considera como radiación incidente la fracción de radiación que pasa a través del follaje o la que rebota según el mencionado teorema de placas paralelas semi-infinitas.

De igual manera, el modelo tiene una estrecha relación con la investigación realizada por Deardoff (1978) y Balick et al. (1981) quienes son citados repetidas veces dada su importancia e impacto a nivel investigativo. Estos, plantean inicialmente la relación o influencia de la radiación de onda larga en la interfaz follaje-suelo donde se genera o desarrolla el teorema de placas paralelas semi-infinitas mencionadas anteriormente lo cual consiste en una especie de “rebote” el cual representa el comportamiento entre superficies controladas por la temperatura de estas y parámetros físicos definidas de acuerdo con tipo de superficies involucradas.

Además, son la base o el origen de los balances de energía del follaje y suelo mejor compuestos, con el fin de estimar los valores de Temperatura del follaje (T_f) y del suelo (T_g), considerando los mismos tipos de flujo de calor a excepción del movimiento de agua o influencia de la lluvia.

Frankenstein & Koenig (2004b) por su parte, busca de igual manera encontrar los términos T_f y T_g por medio de solución numérica, lo que para el caso de estudio no se consideró, pues se hizo

uso de equipos de medición de temperatura en superficies (termocuplas) para evitar determinar dichos términos y facilitar el desarrollo o implementación del modelo escogido obteniendo estos términos como entradas o input del modelo.

Aunque este modelo no se implementó explícitamente en el presente caso de estudio, sería necesario llevar a cabo una investigación más detallada asociada a la importancia de calcular dichos valores dada la interrelación que estos poseen con los balances de energía propuestos y los cuales requieren de cálculos más detallados y de profundizar teóricamente en detalle las investigaciones mencionadas previamente con el fin de determinar la Raíz del error cuadrático medio(RECM) de los datos calculados con los medidos experimentalmente.

Siguiendo con la toma de decisión del modelo de transferencia de calor, Sailor (2008) aplica el modelo FASST, representando un modelo del balance de energía de una cubierta verde, el cual a su vez desarrolló e integró al programa de simulación energética en edificaciones, EnergyPlus. El diseño de esta herramienta permite a quien lo aplique el poder modelar y explorar diversas opciones de diseño para la construcción de una estructura de cubierta verde teniendo en cuenta diversas propiedades a la hora del diseño constructivo como lo son, el medio de crecimiento, su espesor o características de las plantas como el tupo, su altura o incluso el Índice de Área Foliar (LAI).

Para la aplicación del modelo, se plantea un esquema donde los tipos de transferencia de calor se ven evidenciados de acuerdo con la radiación solar (I_s); su influencia en el follaje y suelo. Además, Las componentes del calor latente (L) y sensible (H) para el follaje y el suelo (subíndices f y g), las cuales aportan carga al sistema de acuerdo con su magnitud. Por último, se puede apreciar el intercambio complejo de radiación de onda larga (LW) en donde se tiene en cuenta un análisis

específico para la interfaz follaje-sustrato con el fin de determinar este comportamiento de la radiación y el flujo de calor asociado al proceso de conducción.

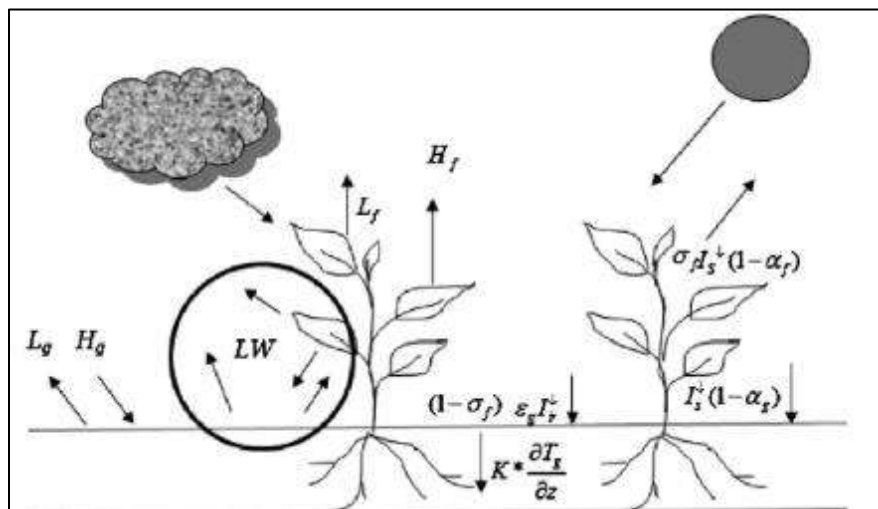


Ilustración 23 - Balance de energía del suelo

Fuente: (Sailor, 2008)

En los balances de energía del follaje (Ecuación 15) y suelo (Ecuación 16), se evidencia la similitud con el modelo FASST. En este modelo, se plantea la misma solución numérica para lograr determinar las temperaturas del suelo y del follaje o T_f y T_g . Los términos aplicados de acuerdo con los tipos de transferencia de calor respetan los parámetros propuestos en el modelo FASST. Una excepción relevante, es que el proceso de conducción en la solución numérica es resuelto dentro del esquema de solución de EnergyPlus con las funciones de transferencia por conducción (CTF).

Esta consideración, se ve afectada en términos de exactitud o estabilidad, sí se considera que las propiedades térmicas de la capa modelada varían en el tiempo (fenómeno existente). Por lo que, para control del algoritmo, Sailor (2008) limita o controla la tasa a la que la precipitación y el

riego afecta la humedad del suelo (limitada a 0.0125 m o media pulgada) y limita además la velocidad de cambio real de las propiedades térmicas en un 10%.

Aunque para esta época (2008), el método de solución por diferencias finitas se encontraba en pruebas y en desarrollo, el autor plantea la opción de hacer uso de este en lugar de las funciones de transferencia por conducción (CTF), pues este brinda resultados más estables en condiciones de cambio de propiedades térmicas (Sailor, 2008).

Además, este programa considera como input del modelo algunas variables físicas que el programa pide por defecto para llevar a cabo los balances de energía, lo que para el caso de estudio dado el enfoque de querer aplicar el modelo usando lenguaje de programación “R”, este no aplicaba; pues a pesar de que el uso de este programa facilita el desarrollo de un diseño de cubierta verde, se buscaba aplicar teoría y conocimientos asociados a conceptos de simulación para generar un modelo que represente el efecto de una cubierta verde extensiva.

En adición, Sailor (2008) considera en su simulación aspectos que afectan más allá que a la envolvente como el tipo de actividad de la edificación el cual se define como “Oficina/profesional” lo que representa una densidad ocupacional de 3.91 personas/m² y lo cual representa por defecto una intensidad de carga de 8.07 W/m². Así mismo, se manejó una cubierta en concreto y consideraciones en términos energéticos como los cambios de consumo en los niveles de gas o por otra parte el cambio del LAI en la temporada de invierno.

Estos efectos no aplican al caso de estudio al considerar un ambiente húmedo-tropical donde no hay estaciones a diferencia de dos temporadas de “invierno” o lluvias lo que no genera un uso de sistemas de calefacción y donde las plantas no pierden sus hojas por el cambio estacionario lo que no afecta en teoría la magnitud del índice de área foliar (LAI). Además, la capa drenante genera

ciertos efectos asociados a cambios de fase y control de escorrentía los cuales no fueron tenidos en cuenta, consideración que se comparte en el presente caso de estudio.

Sin embargo, es un modelo el cual requiere atención y su futura aplicación en el programa EnergyPlus con el fin de, explorar todas las implicaciones energéticas asociadas al diseño e implementación de una cubierta verde extensiva simple y de cuantificar las mismas en términos de análisis de costos de ciclo de vida de la estructura, dadas las estimaciones cuantitativas del potencial de ahorro energético (Sailor, 2008)

El modelo logró identificar, por ejemplo, una relación entre el espesor del sustrato con el aislamiento térmico, donde al tener un suelo con mayor espesor, se reduce la demanda de calentamiento o enfriamiento, lo que significa que aumenta el aislamiento térmico. Del mismo modo, una relación entre el Índice de Área Foliar (LAI) y el consumo energético, donde en verano el consumo es el mínimo mientras que en el invierno ocurre lo contrario; debido a los efectos de sombreado los cuales son más benéficos en términos de carga térmica en verano.

Con esto, aunque para el caso de estudio no hay influencia de las estaciones climáticas, tener en cuenta este modelo para una futura aplicación y consideración puede ser de suma importancia al momento de proponer una idea de negocio; en la cual es importante presentar al cliente, cuál sería su verdadero ahorro o pérdida en términos monetarios de acuerdo con el aislamiento térmico que una cubierta verde extensiva pueda aportar a una edificación específica.

Por último, teniendo en cuenta que (Sailor, 2008) logró validar el modelo con base en datos obtenido a partir de una cubierta verde extensiva instalada en University of Central Florida en el 2005, se justifica una razón más para llevar a cabo investigaciones futuras con un enfoque más asociado al desarrollo de una idea de negocio y más aun teniendo para el caso de estudio actual,

una cubierta verde con equipos de medición útiles para dicha aplicación y validación, así como se pudo evidenciar en (Sailor, 2008).

Por otra parte, siguiendo con los autores, se referencia el trabajo de Konkov (2018), quien busca describir los fenómenos físicos que ocurren en el medio de crecimiento de una cubierta verde extensiva, para esto tiene en cuenta los tres procesos principales que se ven involucrados en la transferencia de calor o energía de un sistema; los cuales son radiación de onda corta y larga, convección (calor sensible), evapotranspiración o calor latente y conducción.

En adición, incluyó el movimiento de agua, o la influencia que el agua tiene en el balance de energía. De esta manera propuso un modelo detallado de cubierta verde, de transporte de calor y humedad los cuales son manejados por dos modelos copulados o fusionados. Un modelo vegetal y un modelo de calor y humedad (HM). A este le llama HAMFit-GR el cual involucra todo el sistema desde la vegetación hasta la envolvente de la edificación.

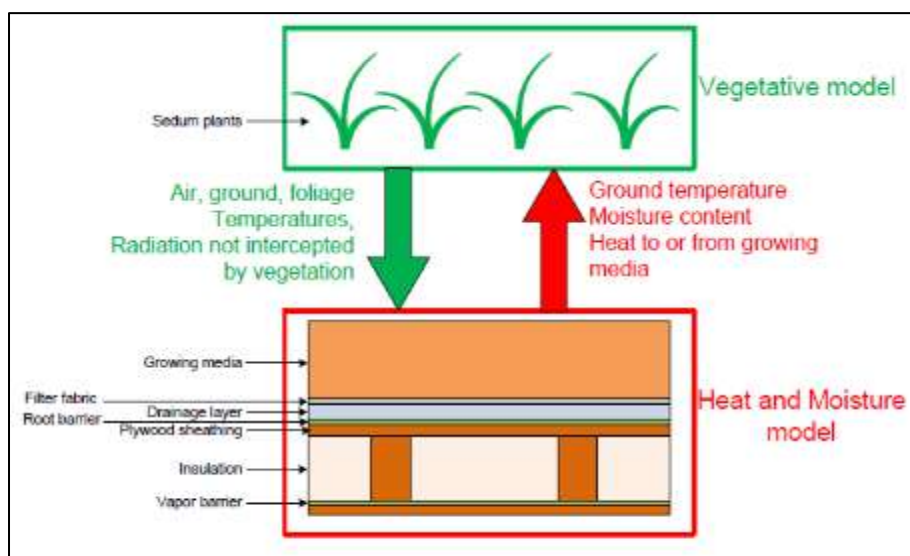


Ilustración 24 - Modelo de cubierta verde

Fuente: (Konkov, 2018)

Este modelo, tiene en cuenta la energía que deja el sistema por convección debido a la escorrentía y la influencia de esta en todo el sistema: follaje, sustrato y la envolvente. Según el autor, la escorrentía posee alta influencia sobre el balance hídrico global; pues, el flujo del agua líquida genera de transferencia de calor por convección y dada la existencia y alto desarrollo de diversos modelos vegetales, argumenta la necesidad de un modelo que tenga en cuenta este fenómeno en detalle con el fin de obtener una mayor precisión.

De esta manera, basa su modelo vegetal principalmente en el trabajo desarrollado por Frankenstein & Koenig (2004b) donde define como propósito principal, el determinar la Temperatura del follaje (T_f) con el fin de calcular condiciones de frontera del modelo de calor y humedad el cual es responsable del movimiento dentro del techo incluyendo la Temperatura del suelo (T_g); la cual, a su vez, corresponde a un input del modelo.

Por lo tanto, se seleccionó inicialmente este autor pues la estructura que le dio a su investigación coincidía en cierta parte con lo buscado inicialmente, dada la detallada revisión bibliográfica al momento de exponer el modelo empleado, ya que, aunque sea la implementación del modelo FASST, realiza cambios de acuerdo con correcciones o cambios que se han realizado a través de los años con respecto a este modelo y su implementación para sistemas de cubiertas verdes.

Por ejemplo, para determinar la resistencia estomatal la cual se considera de suma importancia, simplifica el cálculo de dicha variable como lo estipula Sailor (2008), la implementación de datos teóricos o inputs a base de experimentación para los valores asociados al contenido de humedad del medio de crecimiento o sustrato.

Por otra parte, la influencia del movimiento de agua, así como en el modelo FASST requiere de un análisis más detallado para su comprensión lo que amerita un estudio más detallado y específico para su implementación por lo que se optó en el presente caso de estudio, omitir e implementar de modo provisional el modelo de Konkov (2018) con fines comparativos de aprendizaje; es decir, se aplicó con el fin de estudiar un primer modelo vegetal validado y recopilar información acerca del mismo para su posterior análisis.

Aunque este, contiene la fusión o copulado de ambos modelos planteados por Konkov (2018), solo se tuvo en cuenta el modelo vegetal. Este representa un intercambio de calor de estado estacionario entre las capas de follaje y el medio de crecimiento o sustrato y es válido para el caso de estudio; pues, representa de modo general la influencia de diversas variables físicas asociadas al proceso de transferencia de calor en un sistema de cubierta verde extensiva junto a sus tres tipos principales comunes.

Además, respeta los parámetros propuestos por Frankenstein & Koenig (2004b), pero a su vez realiza algunos ajustes y consideraciones que facilitaron el análisis de este. Así, la estructura de los balances de energía de follaje y del suelo, ecuaciones 19 y 20 respectivamente, antes de la fusión con el modelo de calor y humedad, coinciden con los modelos vegetales investigados para el presente caso de estudio en términos de la estructura de las ecuaciones y de unidades, lo que hizo escogerlo como primera opción.

Así como sucedió con Frankenstein & Koenig (2004b), el último término del balance de energía del suelo, aparentemente no posee congruencia dimensional por lo que justificó aún más el no tener en cuenta la sección de movimiento de agua para llevar a cabo la implementación del modelo vegetal; sobre esta sección, no se encontró mucha información acerca de las ecuaciones implementadas, pero al probarlas analíticamente, alteraban el balance de manera significativa, por

lo que se optó, no llevar a cabo su uso, ya que los datos preliminares no manejaban un orden lógico. Así mismo es necesario un análisis más detallado a dicha sección con fin de lograr interpretar los términos que la rodean para su correcta aplicación.

Independiente a estos problemas, un último criterio que aportó significativamente para la toma del modelo como un referente, correspondió al poder determinar de modo experimental y analítico los términos de Índice de Área foliar (LAI) y Cobertura Fraccional del follaje (Sf), sin tener que depender de valores estándar; lo que brindó mayor confianza al tener los valores más aproximados o reales de dichas variables de acuerdo al tipo y configuración de la vegetación escogida para el presente caso de estudio.

De este modo, para el cálculo de la tasa de cobertura vegetal o Cobertura Fraccional del Follaje (Sf) y el Índice de Área Foliar (LAI), los cuales representan, la proporción del área verde con respecto del área total y la proporción de área de hojas por unidad de superficie de suelo, respectivamente; se aplicó el software de diseño asistido por computador AutoCAD, pues, aunque existen programas como Image-Pro Plus o incluso el uso del lenguaje de programación MatLab para calcular estas variables, se debe aclarar, que en el proyecto en cuestión se desarrolló a través del antes mencionado, debido al fácil manejo y conocimiento previo del mismo por parte de los autores.

Siguiendo con Konkov (2018), se tomó el modelo como un referente y correspondió a la primera opción para aplicar al caso de estudio, debido al planteamiento del modelo (práctico) y a la versión más actual y validada acorde a los referentes del modelo FASST; pues este, fue completamente validado por medio de datos medidos y calculados de temperatura, flujo de calor y contenido de humedad dentro del medio de crecimiento y superficie del follaje. Además, se logra identificar que, aunque exista una fuerte relación con el modelo de Frankenstein & Koenig

(2004b), este posee datos reales del caso de estudio, calculados y medidos experimentalmente lo cual le da mayor validez y se ajusta a la presente investigación.

Así mismo, en el análisis de sensibilidad se encontró como los parámetros más críticos el Índice de Área foliar (LAI) y la Cobertura Fraccional del follaje (Sf). Lo que coincide con autores como Tabares (2009), Zhang et al. (1996) y Kumar & Kaushik (2005). Por último, aunque no se consideró el movimiento de agua en el modelo, se tiene como un referente para su posterior implementación, al lograr obtener por ejemplo como resultados principales, la retención del agua lluvia entre el 70 y 80 % al haber simulado una retención del 60%.

Por otra parte, y cómo último referente, se tuvo en cuenta a Paulo Tabares, quien desde el año 2009 ha venido investigando, desarrollando, validando y ajustando, su modelo de transferencia de calor; el autor, menciona la existencia de dos procesos adicionales en su balance de energía, los cuales corresponden al almacenamiento térmico del sustrato y las plantas, y al almacenamiento metabólico de la vegetación. El autor considera que el caso de estudio corresponde a un estado casi estacionario en la transferencia de calor, por lo que desprecia el almacenamiento térmico. Lo mismo ocurre con el almacenamiento metabólico el cual es despreciado de igual modo; pues este, solo representa entre el 1 - 2 % de la radiación neta (Tabares, 2009).

De esta manera, aunque el concepto y la idea de representar las variables físicas sea la misma, uno de los elementos que diferencia a Paulo Tabares, del resto, es la consideración de entradas al modelo las cuales lo complementan y hacen aplicable a casos reales de cubierta verde, como lo son por ejemplo el coeficiente de extinción y la transmitancia, para el proceso de radiación, las cuales dependen explícitamente, de la configuración de la capa vegetal.

Así mismo, a través de los años, ha alterado su modelo o incluso propuesto y validado nuevas versiones para su aplicación con base en la estructuración de ecuaciones empíricas por medio de datos experimentales de estado casi-estacionario. Todo esto con ayuda del aparato experimental “Cold Plate” e información obtenida a través de investigaciones asociadas a cubiertas verdes, suelos e información meteorológica global. Por medio de este aparato, han podido identificar realmente la importancia de la conductividad térmica del sustrato y las tasas de evapotranspiración para sistemas de cubiertas verdes (Tabares-Velasco & Srebric, 2011).

Este aparato experimental corresponde a una “cámara” de control o un espacio en donde se controlaron las condiciones meteorológicas con el fin de llevar a cabo pruebas y mediciones experimentales para el postulado de ecuaciones empíricas. Por medio de esto, Paulo Tabares ha logrado a través de los años obtener información experimental muy valiosa acerca de las variables físicas medidas y asociadas en el proceso de transferencia de calor en una cubierta verde extensiva, permitiendo al mismo tiempo calibrar su modelo para obtener una versión cada vez más acertada.

Cada proceso asociado al balance de energía propuesto por Tabares (2009), al igual que los otros autores se encuentra en unidades de W/m^2 . Además de compartir la congruencia dimensional, la propuesta general del balance de energía es muy similar, hablando de los flujos que se evidencian en un sistema de cubierta verde extensiva. Junto a los autores citados previamente, existen relaciones de acuerdo con diversas fuentes y valores teóricos límites los cuales se utilizaron en la aplicación del modelo.

Tabares-Velasco & Srebric (2011) por su parte, proponen un modelo completamente validado con base en la propuesta realizada por Tabares (2009) de acuerdo con los datos obtenidos a partir el aparato experimental y de la consideración de que todos los flujos de calor en el sistema de

cubierta verde están interconectados y dependen uno de otro; por lo que, se considera transferencia de calor y masa entre el cielo, plantas y sustrato.

De este modo, proponen los balances expuestos en las ecuaciones 31, 32 y 33, donde tienen en cuenta inicialmente un balance de energía asociado a un escenario en el cual, la cubierta se encuentra “desnuda” o sin presencia de capa vegetal (*Ilustración 25*). Esto se debe a que, al existir estaciones climáticas, en ciertas condiciones extremas la capa vegetal puede morir por lo que esta consideración es de suma importancia. Sin embargo, para el caso de estudio esto no es relevante dadas las condiciones meteorológicas a las cuales ve expuesta la estructura.

En la siguiente figura se puede apreciar la representación del proceso de transferencia de calor más aproximado para este escenario donde participan principalmente los procesos de convección (calor sensible, Q_S), evaporación (calor latente, Q_E), radiación (Onda corta, R_{sh} y larga, Q_{IR}) y conducción (Q_c). Estos mecanismos de transferencia de calor respetan los parámetros dimensionales ya estipulados y los procesos principales de transferencia de calor previamente expuestos en la sección 6.3.1.

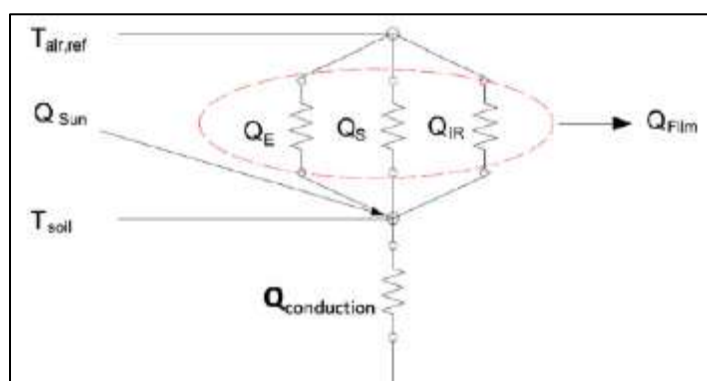


Ilustración 25 - Circuito térmico para flujos de calor considerados en un modelo de cubierta verde sin capa vegetal ($S_f = 0$).

Fuente: (Tabares-Velasco & Srebric, 2011)

Seguidamente, Tabares-Velasco & Srebric (2011) proponen balance para un escenario donde se considera que la cubierta verde se encuentra totalmente cubierta de vegetación o, en otras palabras, que el valor de Cobertura Fraccional del Follaje (S_f) corresponde a 1. Este, incluye procesos importantes clásicos en un modelo de cubierta verde como lo son, el sombreado que genera las plantas (aumento del S_f), la transpiración que sufren las plantas (componente de transferencia de calor latente) y la influencia del viento en los procesos de, convección o transferencia de calor sensible y evapotranspiración o transferencia de calor latente.

Por otra parte, para la transferencia de calor convectivo o calor sensible, encontró los menores valores para este proceso de transferencia de calor al proporcionar de modo experimental los mayores valores de velocidad de viento. Esto debido al aumento en las tasas de evapotranspiración.

Siguiendo con Tabares-Velasco & Srebric (2011), en la siguiente figura (*ilustración 26*) se representan los procesos de transferencia de calor asociados al escenario planteado donde realiza por separado el balance para la sección del follaje o las plantas (Ecuación 32) y el sustrato o medio de crecimiento (Ecuación 33).

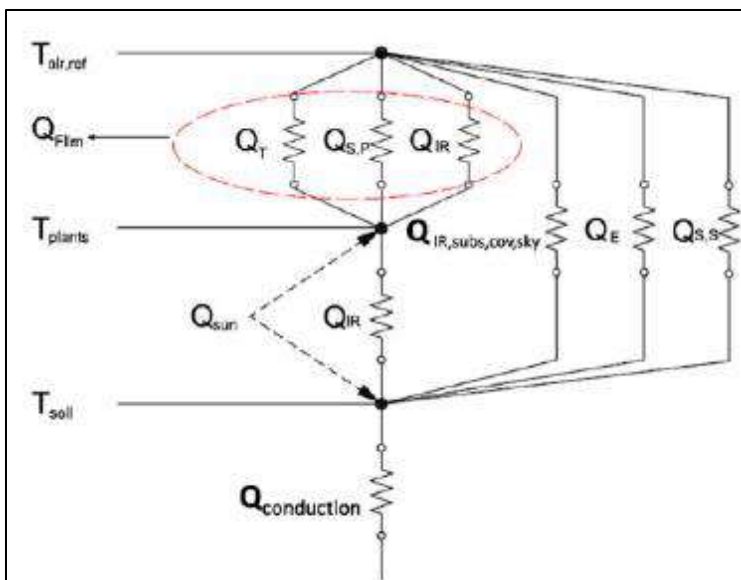


Ilustración 26 - Circuito térmico para flujos de calor considerados en una cubierta verde completamente vegetada ($S_f = 1$).

Fuente: (Tabares-Velasco & Srebric, 2011)

Así mismo, en las figuras 25 y 26 se logra apreciar la representación de todos los flujos de calor (W/m^2) que actúan sobre proceso de transferencia de calor y se puede apreciar como el flujo conductivo ($Q_{conduction}$) se analiza aparte de cómo se planteó inicialmente como un sistema de estructuras compuestas propuesto por Kreith (1970). A su vez, en la sección 6.3.1 se considera analizar el sistema como un circuito eléctrico lo que da razón a la composición del diagrama como un sistema generalmente en serie.

De este modo, considerar los dos escenarios ($S_f = 0$ y $S_f = 1$) por separado, corresponde a una suposición muy alejada a la realidad, pues, como ocurre en el presente caso de estudio, se buscó instalar la estructura de cubierta verde con la mayor cantidad de vegetación posible, teniendo en cuenta el menor gasto de acuerdo con desarrollo del proyecto; usando las muestras que se fueron cuidando y reproduciendo a través de los primeros 6 meses de la investigación.

Así, Tabares-Velasco & Srebric (2011) proponen un análisis para mitigar dicho sesgo, donde se debe asumir un circuito paralelo entre estos dos escenarios con el fin de lograr determinar el flujo de calor que pasa a través del techo (envolvente) y la evapotranspiración total del sistema; teniendo en cuenta la Cobertura Fraccional del Follaje (S_f) real y el desarrollo en simultaneo de ambos escenarios ya planteados ($S_f = 0$ y $S_f = 1$), como se plantea en las ecuaciones 34 y 35.

Sin embargo, dicho análisis requiere de todas las variables asociadas al proceso de transferencia de calor como la ecuación 34 lo representa. Y dado el enfoque y aplicación del modelo de transferencia de calor en el presente estudio, la temperatura interna o inferior en el diferencial de temperaturas de la ecuación de flujo conductivo (Q_{cond}) corresponde a la temperatura necesaria para llegar a la temperatura de interés (Temperatura de la habitación).

Además, se tiene la componente de la radiación de onda larga ($Q_{IR,S,P}$) la cual puede variar de acuerdo con el planteamiento. Como se mencionó previamente en la sección del modelo de Konkov (2018) donde planteó la existencia de dos placas paralelas infinitas por lo que, se define un tipo de ecuación para representar el intercambio de calor entre estas dos placas (plantas y el medio de crecimiento). Por otra parte, Tabares & Srebric (2011) adicionan la suposición de que existen dos superficies paralelas con diferentes áreas y expone la existencia de un tercer escenario donde el área del sustrato está rodeada por un área mayor de follaje.

De igual manera se comprobó que las suposiciones son aceptables pues los valores obtenidos no representan variación significativa y esto se asocia a los valores de emisividad los cuales no varían en el sustrato y las plantas. En conclusión, dada la simplicidad de la suposición de placas paralelas infinitas la cual también es usada por Konkov (2018) y la no afectación en la precisión de los cálculos, hace que esta se tome como la referente para representar la radiación de onda larga en el proceso de transferencia de calor (Tabares-Velasco & Srebric, 2011)

Por otra parte, para el proceso de convección o flujo de calor sensible, se considera una resistencia a la transferencia de calor convectivo, utilizando el número de Nusselt (Nu) para los regímenes de convección forzada, mixta o transitoria y natural, en una superficie plana. Estos regímenes dependen de los números Grashof (Gr) y Reynolds (Re) Tabares-Velasco & Srebric (2011). Además, para convección libre el número de Nusselt puede ser estimado en función de, el número de Grashov y el número de Prandtl Quzada et al. (2020).

Sin embargo, Tabares-Velasco & Srebric (2011) plantea una relación de acuerdo con número de Péclet y su relación con el número de Nusselt considerando la teoría de capa límite, lo que se evidencia en Bejan (2013) quien argumenta el problema de esta al tener en cuenta que el valor de viscosidad cinemática (ν) tiende a desaparecer mientras más se aleje de la pared; pues, por medio de la solución de Blasius se logró observar que el valor de ν tiene a un valor finito. Este método, se suele emplear para la solución de planteamientos no-lineales para problemas de capa límite, por lo que no aplica al caso de estudio y por lo que se argumenta la toma de decisión del planteamiento utilizado por Tabares-Velasco & Srebric (2011).

Para este, es necesario conocer propiedades termodinámicas específicas como como el coeficiente de dilatación térmica (β), viscosidad cinemática (ν) o difusividad térmica, entre otros e investigar más a fondo este tipo de transferencia de calor por todas las variantes que el mismo posee. Por lo que, para el caso de estudio, se encuentra fuera del alcance planteado; sin embargo, se consideraron valores teóricos extraídos de Kreith et al. (2011) con el fin de aplicar una solución a la transferencia de calor e implementar el modelo teniendo en cuenta el aire seco a presión atmosférica como el fluido asociado al proceso de convección.

De este modo, se aclara la necesidad de enfocar futuros estudios, explícitamente al análisis de este tipo de transferencia de calor dada su importancia y complejidad; con el fin de obtener una

versión mejorada del modelo implementado y más cercana a la realidad de un proceso de transferencia de calor. Así lo evidencia Ayata et al. (2011), quienes compararon las predicciones de diferentes modelos teóricos con datos experimentales aplicando y analizando estos modelos a convección forzada y libre.

Así, por medio del cálculo del error cuadrático medio, se encontró una buena relación de los modelos propuestos, con valores relativamente bajos (<30). Gracias a lo anterior, se optó por considerar el método de *Mc Adams* solo con fines comparativos, pero se llevó a cabo la implementación de la ecuación de Deardoff la cual es muy similar a la ley de enfriamiento de Newton y la cual se implementó con ciertos ajustes por Konkov (2018). Esta, posee variables que deben ser medidos in situ; aunque, para el caso de estudio, fueron tomadas del planteamiento propuesto por Konkov (2018) y Frankenstein & Koenig (2004b)

Por otra parte, el caso de estudio solo plantea el uso de dicha ecuación para determinar el flujo de calor convectivo en el sustrato considerando el segundo escenario, donde hay ausencia total de vegetación en la cubierta verde ($S_f = 0$) por lo que dada la configuración de la ecuación de flujo y de las variables físicas que la componen, cómo lo es por ejemplo una variable tan importante como la velocidad del viento, se ajustan a las condiciones reales de dicho escenario.

Sin embargo, cabe aclarar la importancia de contar con equipos de medición calibrados y de alta calidad para evitar errores en la toma de datos experimentales, los cuales, puede alterar significativamente los resultados esperados, así como el buen manejo e instalación de estos, cómo lo presenta Tabares (2009) donde evidencia el problema con los termistores al momento de tomar las medidas superficiales del follaje, pues, aunque estos poseían una precisión de ± 0.2 °C, su superficie de contacto solo abarcaba la mitad de la hoja por lo que la medida se vio constantemente alterada por la radiación recibida por el sistema.

Seguidamente, Tabares-Velasco & Srebric (2011), relaciona sus investigaciones estrictamente a temas asociados a cubiertas verdes en sí. De este modo, evidencia información más específica de variables físicas importantes en un proceso de transferencia de calor en una cubierta verde extensiva. Como ocurre con la resistencia estomatal donde, por ejemplo, expone los límites propuestos por Jones (1992), quien determinó valores típicos de la resistencia estomatal para plantas *Sedum* como las implementadas en el caso de estudio, los cuales aún se utilizan, son aceptables, respetan los límites estipulados para este tipo de vegetación y corresponden a valores entre 450 y 1000 s/m.

Lo mismo ocurre con el cálculo de esta variable, pues a través de los años se le ha dado mucha importancia, pues ha sufrido múltiples regresiones con el objetivo de incrementar la precisión de los modelos. Para el presente caso de estudio, se consideraron dos métodos para el cálculo de esta variable, el propuesto por Konkov (2018) y Tabares-Velasco & Srebric (2011).

De este modo, ambos métodos han ido sido alterados a través de los años; para el caso del método propuesto por Tabares & Srebric (2011), su primera versión fue publicada en Tabares (2009) y en la validación de su modelo alteró las funciones empíricas que componen esta variable; cambios los cuales se consideraron para el presente caso de estudio. Esto sucedió con base en la comparación con modelos de cubierta verde los cuales presentan adaptaciones de esquemas de Transferencia en el sistema Suelo-Vegetación-Atmósfera (SVAT), los cuales son usualmente utilizados en análisis meteorológico a meso escala o modelos de circulación generales Tabares-Velasco & Srebric (2011).

El presente caso de estudio plantea en el modelo ambos métodos, pero solo utiliza en el desarrollo del mismo, el propuesto por Tabares-Velasco & Srebric (2011). Esto, debido a que, al analizar el método propuesto por Konkov (2018), se debe definir un límite superior a la variable

(resistencia estomatal), al tener valores de entrada de radiación solar de 0 para obtener valores lógicos como salida. Lo anterior, se plantea considerando una posible falta de profundización teórica de este modelo para la implementación de la ecuación, dada la toma de este como referente y con el fin de comparar resultados preliminares.

Además, Tabares & Srebric (2011) argumentan factores de corrección que se han ido ajustando a los valores obtenidos por el aparato experimental “Cold Plate” y mejoras en las ecuaciones para representar dicha variable física lo más parecido a la realidad del tipo de vegetación empleada en la cubierta vegetada.

Con base en los dos métodos mencionados, se tendrá como criterio de selección, el cual logre obtener los mayores valores de resistencia estomatal cuando sea de noche o cuando la radiación solar sea 0 (Alexandri & Jones, 2009). Pues, por concepto general la resistencia estomatal corresponde a la resistencia interna de la planta al flujo de vapor a través de la superficie de la hoja y para el tipo de vegetación empleado, dicha resistencia toma los mayores valores bajo las condiciones ya planteadas ($I_s = 0$). Sailor (2008), por su parte, la define como la resistencia a la difusión de vapor de agua por parte de las estomas a la atmósfera.

Cómo ya se mencionó previamente, Tabares (2009) aclara la importancia del Índice de Área Foliar (LAI) para determinar la resistencia estomatal, pero esta variable física viene a ser de mayor relevancia ya que controla las pérdidas de agua del sistema lo que se traduce en la transpiración de la planta o flujo de calor latente; donde, este depende a su vez, de las propiedades físicas de la planta y la resistencia estomatal, la cual controla las pérdidas de agua.

Continuando con variables de suma importancia, la influencia de la velocidad del viento se considera de suma importancia, cómo lo concluye Tabares (2009), al proponer esta variable física

como las más influyentes en el proceso de evapotranspiración o transferencia de calor latente; al lograr determinar incrementos entre el 10 y 30% en el proceso de evapotranspiración al aumentar la velocidad del viento 10 veces.

En adición, como Zhang et al. (1996) lo evidencia, al definirla como una variable de suma importancia para el cálculo de la resistencia aerodinámica, pero la cual toca medir en diversos puntos estratégicos.

Siguiendo con el proceso de evapotranspiración, este corresponde a un proceso el cual se basa principalmente en la transpiración de las plantas y evaporación del sustrato; lo que viene a darse como una combinación de ambos escenarios. Además, tiene como principal responsable, el contenido volumétrico de agua (VWC). Variable cuya relación cuantitativa es directamente proporcional al flujo de calor latente o Evapotranspiración Tabares (2009).

Esto lo demuestra Tabares (2009) quien encuentra tasas de evapotranspiración altas y con crecimiento constante desde valores de VWC por encima de 0.14. Además, al analizar los datos experimentales, se encontró que para el escenario con vegetación ($S_f = 1$), el flujo de calor latente fue significativamente mayor con respecto al escenario sin vegetación ($S_f = 0$), para los mismos valores de contenido volumétrico de agua (VWC). Mientras que las tasas de evapotranspiración disminuyen lentamente cuando el VWC corresponde a valores menores a 0.07.

Concluyendo, para completar toma de decisión de este modelo, el modelo se encuentra validado y ha sido alterado con diversas mejoras para el mejor rendimiento del mismo. Este considera todos los flujos que participan en el proceso de transferencia de calor en una cubierta verde, los cuales se encuentran relacionados y dependen entre ellos. De este modo, el modelo considera, además, la transferencia de calor y masa entre el cielo, plantas o follaje y sustrato. A su

vez, representa la capa vegetal como un medio de crecimiento para la transferencia de calor y masa por convección.

Así mismo, el modelo predice acertadamente la mayoría de los tipos de transferencias de calor y masa a excepción de los valores de evapotranspiración, los cuales se encuentran por debajo de lo esperado, lo cual puede corresponder a la sobreestimación de la resistencia estomatal. A su vez, declara el LAI como la variable que mayor efecto posee en la reducción del flujo de calor a través del techo. Cómo lo define Zhang et al. (1996), cuando afirma que la temperatura de la superficie disminuye al aumentar el LAI y por lo tanto el “sombreado”. Por último, se aclara la implementación del modelo en un caso real con el fin de evaluar el impacto de los flujos y las cargas térmicas a la envolvente.

Finalmente, un factor determinante corresponde a que el modelo está completo y aunque es necesario profundizar en ciertos aspectos teóricos como se ha mencionado, a diferencia de Konkov (2018) no fue necesario ignorar ciertos términos del balance de energía. Junto a ello, la practicidad a la hora de aplicar el modelo y los valores de referencia, son de gran ayuda junto a los artículos publicados por el autor a través de los años donde cada vez una mejor versión del modelo iba surgiendo.

.8.3. Ajuste de datos para toma de decisión del modelo

Para generar los histogramas de frecuencias de la adaptación de los modelos de transferencia de calor se utilizó el lenguaje de programación R el cual facilita la inserción de los datos y la interpretación de estos por medio de histogramas, y códigos realizados para intentar ajustar las dos simulaciones obtenidas y de esta manera conocer cuál sería la distribución a la que los datos darían cumplimiento de los parámetros.

En los resultados de la adaptación del modelo de transferencia de calor desarrollado por Konkov (2018), es de resaltar que se despreciaron los datos negativos debido a que en ningún escenario sería posible que en el interior de la habitación se produjeran temperaturas efecto de la instalación de la cubierta verde por debajo de los 0°C. Mientras, que para la formulación matemática de Tabares & Srebric (2011) sí se consideraron todos los resultados debido al buen comportamiento de los mismos.

Una vez realizado el ajuste en R-Studio y graficando los parámetros tal como la curva de densidad de los datos, el gráfico de cuantil-cuantil, la función de distribución acumulada CDF y el P-P plot en aras de observar cuál de las distribuciones correspondía más y así elegir cual sería el autor escogido para la simulación.

.8.4. Estimación del error cuadrático medio

Para el desarrollo o cálculo del error de los datos, estos pueden estar asociados a ser sistemáticos los cuales comúnmente se repiten en todas las medidas debido a la calibración de los instrumentos de medida o en fórmulas y teorías incorrectas, condiciones experimentales no adecuadas y técnicas experimentales imperfectas (Pérez, 2001).

En la estimación de dicho valor, se recalca que este depende del residuo o diferencia entre cada una de las medidas realizadas o en el proyecto en cuestión las simuladas y el promedio de las variables las cuales se asimilan a los registros con los equipos de medición compatibles con Arduino con el fin de evaluar el error entre la serie de datos calculados en contraste con las mediciones de la temperatura del interior de la habitación para una misma cantidad de datos.

9. Decisión de especies de plantas, esparcimiento y prototipo

Una vez generada la recopilación de los modelos de transferencia de calor y el de optimización financiera del proceso junto a los elementos de la etapa constructiva de la cubierta verde, se adquirieron diferentes macetas de plantas tipo *Sedum Soleirolia Soleirolii*, conocida comúnmente como “lágrima de ángel” o “lágrima de suegra”.

Fueron 3 macetas las adquiridas inicialmente en un vivero en cercanías a la ubicación de la futura cubierta. Esto se realizó en el mes de junio del año 2020 con el objetivo de esparcirlas de manera progresiva y así disminuir costos asociados con la adquisición de un “tapete” completo para lo que sería la cubierta verde extensiva sobre el techo.

La siguiente ilustración muestra una de las 3 macetas adquiridas para el posterior esparcimiento:



Ilustración 27 - Macetas iniciales de especie *Sedum Soleirolia Soleirolii*

Fuente: Autores

Una vez obtenidas, se dejaron a exposición solar durante una semana y así haber observado el comportamiento a condiciones iguales que la futura cubierta verde. Luego de esto, se esparcieron

en diferentes bandejas en el patio de la vivienda, 20 de estas con espesor de sustratos iguales y otras 4 con variación en la altura, todo esto como adicionales del análisis del comportamiento de las plantas a la exposición solar futura del techo verde.

En la siguiente imagen se aprecia las 24 bandejas producto de las 3 macetas inicialmente adquiridas con valor de tan solo \$16.500



Ilustración 28 - Propagación de las 3 macetas iniciales

Fuente: Autores

En estas bandejas estuvieron aproximadamente un mes donde se observó que el comportamiento fue el adecuado y por tanto se subieron a la placa del baño que se sitúa junto al lado de dónde estaría la cubierta verde y esta vez se usaron aún más bandejas realizando variación

en los sustratos que iban desde los 2 cm hasta los 12 cm con el fin de observar el avance y la resistencia a las condiciones reales a las que se expondrían más adelante.

A continuación, se exponen todas las bandejas instaladas sobre la placa del baño que se sitúa exactamente al lado del lugar donde se implementaría la cubierta:



Ilustración 29 - Traslado de bandejas y macetas desde el patio al techo

Fuente: Autor

Era de notarse como varias de las bandejas ya tenían una propagación de las plantas considerable durante los 3 meses que se tuvieron tanto en el patio como en el techo de la edificación donde las condiciones medioambientales serían exactamente las mismas. Producto de este buen comportamiento, se dejaron hasta el mes de diciembre con la finalidad de observar cómo iba siendo la propagación una a una de la especie en las diferentes bandejas teniendo en cuenta los espesores

del medio de crecimiento para que luego pudiesen ser plantadas en un sustrato de 10cm en un lote dentro de la unidad residencial donde finalmente se dejarían por aproximadamente 5 meses en búsqueda de generar un tapete de *Sedum* completo que luego sería instalado en el techo en el futuro techo ajardinado.

El 16 de diciembre se creó un sustrato con compostaje orgánico de los mismos residentes de la edificación y en adición tierra negra de cultivo donde se sembraron todas las plantas producto del esparcimiento generado desde el mes de junio en 2020 a través de diferentes bandejas y macetas.

El cultivo realizado en diciembre, previamente se tamizó para garantizar material fino que permitiera un crecimiento adecuado de las raíces sin que estas se vieran afectadas por algún palo de madera producto del compostaje.

En las siguientes imágenes se muestra un paso a paso de cómo se fue creando el sustrato de 10cm y esparciendo una a una las plantas de las macetas hacia el terreno:



Ilustración 30 – Tamizaje de la tierra

Fuente: Propia



Ilustración 31 - Expansión de tierra sobre plástico para evitar contacto directo con la superficie

Fuente: Propia



Ilustración 32 - Resultado creación cultivo para generar tapete de *Sedum* en 4-5 meses

Fuente: Propia

Una vez generado el cultivo en aras de obtención de un tapete completamente poblado, se construyó un prototipo con otras dos diferentes especies de plantas adicionales como lo eran *Sedum portulaca grandiflora* junto a una planta autóctona conocida como “maní forrajero”, la cual tiene la capacidad de resistir largas sequías, al igual que intensos veranos.

Este prototipo con materiales caseros simuló las diferentes capas de la cubierta verde. Se emplearon caseros que simularan las capas, los cuales fueron: cartón plastificado como impermeabilizante junto con plástico negro, cartón de huevos perforado y forrado con bolsa plástica como lámina drenante, malla de angeo como capa filtrante, lámina de policarbonato como soporte del sustrato y tierra negra de cultivo como medio de crecimiento. También tenía la inclinación de los 23° de pendiente y un sistema de drenaje por medio de una tubería de conducción eléctrica de $\frac{3}{4}$ perforada para evacuación de las aguas lluvias y el riego.

En las siguientes imágenes se detallan los pasos para la construcción del prototipo de cubierta verde:



Ilustración 33 - "Molde" de manera y plástico como impermeabilización

Fuente: Autores



Ilustración 34 - Base forrada con cartón plastificado y cartón de huevos como drenante

Fuente: Autores



Ilustración 35 - Instalación tubo para desagüe y malla de angeo como filtrante

Fuente: Autores



Ilustración 36 – Sellado tubo desagüe y finalización de prototipo

Fuente: Autores

Dicho prototipo se empleó también para conocer la capacidad de drenaje del agua de riego en estado de saturación a través de la tubería de conducción eléctrica observando que cumplió con este requerimiento y en ningún caso se llegó a desbordar el agua a través del módulo de sección.

Es de resaltar que en el mercado actual existen pocas empresas de tipo industrial las cuales provean materiales para construcción de cubiertas verdes, por tanto, en el **Anexo 11** se encuentra una caracterización detallada de los costos y propiedades de las diferentes capas que componen una cubierta verde apuntando al caso del proyecto en cuestión que tiene una pendiente de 23° respecto de la horizontal mientras que en el **Anexo 12** se presenta a detalle los elementos de la estructura existentes como parte de uno de los objetivos de esta investigación.

.10. Refuerzo estructural de la estructura interna de la habitación

De acuerdo con autores como (Borges, 2018) el aporte máximo que se puede generar por una cubierta verde extensiva de 25cm de espesor de sustrato es de 180kg/m^2 y esto sumado a la carga viva de la persona que estará realizando mantenimiento de manera periódica lo cual también se convierte en un aporte de carga en la estructura existente.

Con base en esto se realizó un chequeo para conocer si era necesario o no la realización de un refuerzo de la estructura interna de la habitación tal como se muestra en la ilustración a continuación, debido a que los elementos de madera que soportan las cargas del techo, serían sometidos a esfuerzos adicionales y además teniendo en cuenta que los residentes de la vivienda buscaron siempre garantizar la mejor adecuación o modificación de las cumbreras y viguetas de maderas a través de un profesional especializado en el tema quien asegure el cumplimiento de todos los parámetros y condiciones por la NSR – 10.

A continuación, se presenta el chequeo estructural realizado donde se evidencia que la inercia de la cumbrera de madera es casi el doble cuando se somete a las cargas de la cubierta verde estipuladas (y otras), por tanto, el elemento podría sufrir deflexiones a lo largo de la vida útil del techo vegetal, sin embargo, en ningún momento se llegarían a generar algunas fisura causada por un esfuerzo cortante debido a que esta no llega a superar el valor de diseño original:

| CUMBRERA MADERA | | | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------|--|----------------------------|---|-------|----------------------|
| L= | 5,5 m | | | | | |
| A= | 2,15 m | | | | | |
| Carga | | | | | | |
| Cubierta mas mortero= | | | 80 kg/m ² | | | |
| Impermeablización y machimbre= | | | 20 kg/m ² | | | |
| Cubierta verde | | | 180 kg/m ² | | | |
| Carga viva | | | 160 kg/m ² | | | |
| | | | 440 kg/m ² | | | |
| Carga uniformemente repartida | | | | | | |
| | W= | | 946 kg/m | | | |
| carga eequivalente para deflexiones= | | | | | | |
| | We= | | 946 kg/m | | | |
| Momento maximo | | | | | | |
| | Mmax= | | 3512,32063 kg-m | | | |
| Cortante maximo= | | | | | | |
| | Vmax= | | 2577,85 kg | | | |
| Inercia admisible= | | | | | | |
| | I= | | 20264 cm ⁴ | < | | 10648cm ⁴ |
| E= | 246000 kg/cm ² | | | | | |
| f _m = | 333 kg/cm ² | | b= | | 12 cm | |
| f _v = | 22 kg/cm ² | | h= | | 22 cm | |
| Modulo de sección | | | | | | |
| | Z= | | 958,864489 cm ³ | < | | 968cm ³ |
| Esfuerzo cortante | | | | | | |
| | f _v = | | 14,646875 | < | | 22kg/cm ² |

Ilustración 37 - Chequeo estructural del elemento de madera

Fuente: Autores

Las siguientes imágenes hacen parte de un fragmento en orden cronológico de la adecuación de la estructura interna de la habitación para que soporte las cargas máximas en estado de saturación de la cubierta verde extensiva.

Todos estos trabajos fueron consultados de manera adicional ante un especialista en el tema debido a que los residentes de la edificación querían tener la certeza del cumplimiento del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10



Ilustración 38 - Adecuación de perfiles in situ previos al montaje

Fuente: Autores



Ilustración 39 - Corte de muros para fundida de perfiles

Fuente: Autores



Ilustración 40 - Instalación y fundida de perfiles

Fuente: Autores

Todo el trabajo de modificación de la estructura interna de la habitación requirió de dos elementos de tipo perfil metálico de dimensiones 100x200x2.00mm con el fin de reducir la luz de flexión y de esta manera reducir los momentos actuantes. Para la fijación del perfil en las vigas de la estructura actual se usaron pernos A325 de base de acero al carbono tratados térmicamente y aceros aleados. Estos cumplen con una resistencia de dos o más veces que la de los pernos ordinarios y son clasificados de alta resistencia usados para todo tipo de estructuras desde pequeños edificios hasta rascacielos y puentes de gran magnitud (Lara, 2014). Por último, estos pernos se fijaron a las platinas de A36 de 200x150 mm con espesor $e=3/8$ " y se dejaron "fraguar" durante 8 días.

Una vez realizada la respectiva intervención en la estructura existente durante dos semanas completas debido a la complejidad y sobre todo a los detalles que requería, se obtuvo como resultado un refuerzo, posterior a la secuencia de imágenes anteriormente mostradas, el siguiente resultado con las dos vigas de 100x200x2mm:



Ilustración 41 – Culminación labores de refuerzo

Fuente: Propia

.11. Modelo de optimización (no lineal) financiero para el proceso constructivo

Una examinación bibliográfica realizada en diferentes fuentes de investigación en aras de identificar cuales modelos permitían optimizar desde el área financiera el proceso de construcción con el fin de mostrar a los propietarios de la vivienda el retorno sobre la inversión realizada en el periodo inicial tomando en consideración la vida útil del proyecto. Esto se puede interpretar como el cálculo de la Tasa Interna de Retorno (TIR) que determina el interés con el que el valor actual neto (VAN) de todos los flujos de caja (tanto positivos como negativos) de un proyecto de inversión sean iguales a cero (Mohammed & Eltahir, 2017); o dicho en otras palabras, es el interés o la rentabilidad que genera la inversión de la cubierta verde para todos los flujos de caja a lo largo de la vida útil.

La propuesta hecha por (Mohammed & Eltahir, 2017) no puede ser aplicable del todo al presente caso de estudio debido a que la alternativa planteada por ambos investigadores para la determinación de la TIR parte de una base sobre la cual todos los flujos de fondos son positivos,

es decir, que los costos menos los beneficios de cada periodo anual sean positivos y para el presente caso de la cubierta verde no es posible debido a que la inversión inicial en el año cero (0) es mayor a los beneficios monetarios que pueden ser representados en ese mismo periodo de tiempo, sin embargo se tendrá en cuenta el esquema general para el cálculo de la TIR con la fórmula inicialmente planteada por estos autores sin hacer uso de la propuesta de modificación.

Es de tener en cuenta que para la optimización financiera hay que conocer cuáles son los componentes que integran una cubierta verde, los cuales, son base en la formulación matemática fueron previamente seleccionadas con base en las conductividades térmicas encontradas y que garanticen el menor valor de esta, sin embargo, en esta sección de metodología se evaluarán financieramente las alternativas en búsqueda de garantizar una rentabilidad superior para los inversionistas del proyecto.

Conjuntamente, se estimarán los costos de implementación con consultas de materiales a determinadas empresas proveedores e instaladores en Colombia, pero debido a que es un tema poco conocido, a la vez son mínimas las empresas que comercializan los productos. De acuerdo con (Garcia, 2010) los sistemas de naturación están compuestos por vegetación, capa de sustrato, capa filtrante, capa drenante, membrana impermeabilizante y un soporte.

A continuación, se presenta un esquema de las capas que componen la cubierta verde, teniendo en cuenta que para la vegetación se seleccionaron especies de tipo *Sedum*; en el sustrato escogido fue con base en el artículo publicado por Vera et al. (2017) y contó de manera proporcional con 1/3 hummus de lombriz, 1/3 tierra negra y 1/3 perlita y por último las demás capas son evaluadas más adelante en búsqueda de conocer cuál sería la opción con un mayor retorno sobre la inversión para los propietarios de la vivienda.



Ilustración 42 – Componentes sistema de naturaleza a instalar

Fuente: Autores

Teniendo en cuenta esta combinación de elementos de la cubierta verde desarrollada para este proyecto, se inició cotizando con la empresa Sika, la cual es de talla internacional con sede en Colombia y quienes son unos de los principales proveedores de los materiales para una cubierta verde, y también con el Centro de la Impermeabilización de Medellín los cuales son clasificados como empresa a nivel industrial y Nacional, con más de 20 años de experiencia en el mercado, por tanto los costos que manejan son de proveedores y terminan siendo más económicos que en el caso de Sika.

Las dos alternativas económicas analizadas para la implementación de la cubierta verde se diferencian en que, para el caso de la opción de Sika, todas las capas son proveídas por esta empresa y para el escenario que incluye el manto asfáltico como capa impermeable contiene los materiales restantes cotizados por la empresa CENTIMP. En ambos escenarios, se maneja tanto las mismas especies de plantas como el tipo de sustrato.

Es de aclarar que todos los costos, tanto de la primera como la segunda alternativa, fueron estipulados de manera proporcional al área de la cubierta verde el cual es de 32.75 m².

Para el caso de la primera alternativa con productos Sika, se presentan a continuación un listado de todos los materiales cotizados por esta empresa los cuales serán evaluados financieramente:

| COSTOS CUBIERTA VERDE CON PRODUCTOS SIKA | | | | | |
|---|--|------------|--------------|--------------------|---------------------|
| ÍTEM | DESCRIPCIÓN | UND | CANT. | V. UNITARIO | V. TOTAL |
| 1 | IMPERMEABILIZACIÓN | | | | |
| 1,1 | Mano de obra de instalación de capa impermeable Sikaplan G-476, preparación de superficie y aplicación de lámina Sika Metal Sheet. Incluye desmonte de tejas existentes y preparación de la superficie | m2 | 30,00 | \$ 24.971 | \$ 749.130 |
| 1,2 | Sarnacol 2130 para preparación previa de la superficie a impermeabilizar. Rendimiento en cualquier superficie de 0,6kg/m2 | kg | 25,00 | \$ 15.657 | \$ 391.436 |
| 1,3 | Sarnafil G-476-15 (2 m x 20 m) Rollo 40m2 | m2 | 40,00 | \$ 67.005 | \$ 2.680.189 |
| 1,4 | Sika Metal Sheet (lámina de 1m x 2m) para fijación de los bordes de la capa impermeable sarnafil | m2 | 2,00 | \$ 328.596 | \$ 657.193 |
| SUBTOTAL PROCESO DE IMPERMEABILIZACIÓN= | | | | | \$ 4.477.948 |
| 2 | EMPOTRAMIENTO DEL MARCO CON DIVISIONES, PLATAFORMA PARA MTTO Y REFUERZO ESTRUCTURAL | | | | |
| 2,1 | Perfiles 4x1 para el borde del marco de la cubierta verde | und | 5,00 | \$ 51.800 | \$ 274.000 |
| 2,2 | Perfiles aguas negras 3/4" x 1.5mm x 6m para las divisiones del sustrato | und | 7,00 | \$ 30.700 | \$ 229.900 |
| 2,3 | Lámina machimbre PVC para protección del deslizamiento de la tierra | und | 5,00 | \$ 30.000 | \$ 165.000 |
| 2,4 | Plataforma para mantenimiento de las plantas | und | 2,00 | \$ 350.000 | \$ 715.000 |
| 2,5 | Soldador para elaboración de marcos y plataformas. Incluye equipos, elementos necesarios para la labor y el ayudante | día | 6,00 | \$ 100.000 | \$ 600.000 |
| 2,6 | Vigas rectangulares de 200x100x3.00mm. Incluye transporte e instalación final por el personal cualificado | und | 2,00 | \$ 585.000 | \$ 1.170.000 |
| 2,7 | Conexión entre viga canal de la habitación y el perfil rectangular del refuerzo por personal cualificado. Incluye elementos y herramientas necesarias para la labor como pulidora, soldadura, entre otros. | und | 1,00 | \$ 1.700.000 | \$ 1.700.000 |
| 2,8 | Materiales adicionales para el empalme entre el perfil y la viga como formaleta de madera, andamios, concreto de 21MPa, varillas corrugadas, entre otros. | und | 1,00 | \$ 750.000 | \$ 750.000 |
| SUBTOTAL ELABORACIÓN MARCO, PLATAFORMA Y REFUERZO ESTRUCTURAL= | | | | | \$ 5.603.900 |
| 3 | CAPAS CUBIERTA VERDE Y SUSTRATO | | | | |
| 3,1 | Sika lámina drenante 32T. Presentación de 2,0m x 25m | m2 | 50,00 | \$ 20.541 | \$ 1.027.050 |

| | | | | | |
|---|--|-------|--------|------------|----------------------|
| 3,2 | Geotextil Sika PP 1800. Rollo de 1,80m x 100m para protección del manto impermeable y como capa filtrante del sustrato de la cubierta verde | m2 | 180,00 | \$ 4.604 | \$ 828.657 |
| 3,3 | Piedra perlita mineral para aligerar la carga del sustrato. No incluye costos de envío desde Bogotá a Bucaramanga. Presentación de 30Kg equivalente a 60L | bulto | 17,00 | \$ 80.000 | \$ 1.360.000 |
| 3,4 | Abono orgánico humus de lombriz con aporte de microorganismos benéficos para el suelo. Alto contenido de nitrógeno y pH neutro. Presentación de 100L. No incluye costos de envío desde Bogotá a Bucaramanga. | bulto | 10,00 | \$ 45.000 | \$ 450.000 |
| 3,5 | Tierra negra orgánica para complementar el sustrato y cumplir con la conductividad térmica esperada | m3 | 1,00 | \$ 130.000 | \$ 130.000 |
| SUBTOTAL CAPAS CUBIERTA VERDE Y SUSTRATO= | | | | | \$ 3.795.707 |
| 4 | ESPECIES DE PLANTAS | | | | |
| 4,1 | Plantas sembradas 4 meses antes del montaje de la cubierta verde para propagación por una sola agua | und | 5,00 | \$ 5.500 | \$ 27.500 |
| 4,2 | Portulaca grandifolia comprada 1 mes antes para cubrir el agua restante | und | 100,00 | \$ 3.000 | \$ 300.000 |
| 4,3 | Bulto de maní forrajero (especie autóctona) para cubrir un agua completa del techo | und | 2 | \$ 40.000 | \$ 80.000 |
| SUBTOTAL ESPECIES DE PLANTAS= | | | | | \$ 407.500 |
| VALOR TOTAL CUBIERTA VERDE INCLUYENDO INSTALACIÓN CON PRODUCTOS SIKA | | | | | \$ 14.285.055 |

Tabla 1 - Costos de aplicación de la cubierta verde con productos Sika

Fuente: Autores

La siguiente tabla representa los costos de aplicación de la cubierta verde extensiva con manto asfáltico edil 3.2mm donde, se destaca que debido a la configuración de la pendiente del proyecto de 23° con respecto de la horizontal, es posible aplicar este manto con facilidad, debido a que el agua drena de una manera más rápida y no se presenta filtración de humedad alguna.

| COSTOS CUBIERTA VERDE CON MANTO ASFÁLTICO DE CAPA IMPERMEABLE | | | | | |
|--|---|------------|-------------|--------------------|-----------------|
| ÍTEM | DESCRIPCIÓN | UND | CANT | V. UNITARIO | V. TOTAL |
| 1 | IMPERMEABILIZACIÓN | | | | |
| 1,1 | Manto asfáltico para protección de goteo y humedad de la cubierta existente | und | 4,00 | \$ 80.000 | \$ 320.000 |
| 1,2 | Manto metaltex pro para traslapes entre cubierta y teja existente | und | 1,00 | \$ 120.000 | \$ 120.000 |
| 1,3 | Mano de obra persona capacitada y con experiencia en aplicación (Incluye herramientas, elementos para aplicación como cilindro de gas, el ayudante y desmonte de tejas) | und | 1,00 | \$ 780.000 | \$ 780.000 |

| | | | | | |
|---|--|-------|-------|--------------|--------------|
| 1,4 | Galón de emulsión asfáltica para protección de juntas y traslajos entre el manto aplicado con las tejas y la respectiva capa de impermeabilización de metaltex | und | 1,00 | \$ 25.050 | \$ 25.050 |
| SUBTOTAL PROCESO DE IMPERMEABILIZACIÓN= | | | | | \$ 1.245.050 |
| 2 | EMPOTRAMIENTO DEL MARCO CON DIVISIONES, PLATAFORMA PARA MTTO Y REFUERZO ESTRUCTURAL | | | | |
| 2,1 | Perfiles 4x1 para el borde del marco de la cubierta verde | und | 5,00 | \$ 51.800 | \$ 274.000 |
| 2,2 | Perfiles aguas negras 3/4" x 1.5mm x 6m para las divisiones del sustrato | und | 7,00 | \$ 30.700 | \$ 229.900 |
| 2,3 | Lámina machimbre PVC para protección del deslizamiento de la tierra | und | 5,00 | \$ 30.000 | \$ 165.000 |
| 2,4 | Plataforma para mantenimiento de las plantas | und | 2,00 | \$ 350.000 | \$ 715.000 |
| 2,5 | Soldador para elaboración de marcos y plataformas. Incluye equipos y elementos necesarios para la labor | día | 6,00 | \$ 100.000 | \$ 600.000 |
| 2,6 | Vigas rectangulares de 200x100x3.00mm. Incluye transporte e instalación final por el personal cualificado | und | 2,00 | \$ 585.000 | \$ 1.170.000 |
| 2,7 | Conexión entre viga canal de la habitación y el perfil rectangular del refuerzo por personal cualificado. Incluye elementos y herramientas necesarias para la labor como pulidora, soldadura, entre otros. | und | 1,00 | \$ 1.700.000 | \$ 1.700.000 |
| 2,8 | Materiales adicionales para el empalme entre el perfil y la viga como formaleta de madera, andamios, concreto de 21MPa, varillas corrugadas, entre otros. | und | 1,00 | \$ 750.000 | \$ 750.000 |
| SUBTOTAL ELABORACIÓN MARCO, PLATAFORMA Y PERFILES= | | | | | \$ 5.603.900 |
| 3 | CAPAS CUBIERTA VERDE Y SUSTRATO | | | | |
| 3,1 | Plástico poli embalse para protección adicional de las raíces en el manto asfáltico | ml | 6,00 | \$ 8.000 | \$ 48.000 |
| 3,2 | Geodren lámina drenante hidrotec | m2 | 40,00 | \$ 27.325 | \$ 1.092.991 |
| 3,3 | Componentes sustrato | | | | |
| 3,3 | Piedra perlita mineral para aligerar la carga del sustrato. No incluye costos de envío desde Bogotá a Bucaramanga. Presentación de 30Kg equivalente a 60L | bulto | 17,00 | \$ 80.000 | \$ 1.360.000 |
| 3,4 | Abono orgánico humus de lombriz con aporte de microorganismos benéficos para el suelo. Alto contenido de nitrógeno y pH neutro. Presentación de 100L. No incluye costos de envío desde Bogotá a Bucaramanga. | bulto | 10,00 | \$ 45.000 | \$ 450.000 |
| 3,5 | Tierra negra orgánica para complementar el sustrato y cumplir con la conductividad térmica esperada | m3 | 1,00 | \$ 130.000 | \$ 130.000 |
| 3,4 | Geotextil no tejido de espesor 1600 PP o 1,6mm | und | 35,00 | \$ 3.500 | \$ 122.493 |
| SUBTOTAL CAPAS CUBIERTA VERDE Y SUSTRATO= | | | | | \$ 3.203.484 |
| 4 | ESPECIES DE PLANTAS | | | | |

| | | | | | |
|---|---|-----|--------|-----------|-------------------------|
| 4,1 | Plantas sembradas 4 meses anteriores al montaje de la cubierta verde para sembrar y generar propagación | | | | |
| 4,1,1 | <i>Sedum soleirolia soleirolii</i> (Lágrima de ángel, suegra, bebé, etc) | und | 5,00 | \$ 6.500 | \$ 32.500 |
| 4,2 | Plantas adquiridas 1 semana antes del montaje para ser trasplantadas | | | | |
| 4,2,1 | Portulaca grandiflora | und | 100,00 | \$ 3.000 | \$ 555.000 |
| 4,2,2 | Bulto de maní forrajero (especie autóctona) para cubrir un agua completa del techo | und | 1 | \$ 40.000 | \$ 40.000 |
| SUBTOTAL ESPECIES DE PLANTAS= | | | | | \$ 627.500 |
| VALOR TOTAL CUBIERTA VERDE INCLUYENDO MANO DE OBRA DEL MONTAJE | | | | | \$ 10.679.934,00 |

Tabla 2 - Costos de aplicación de la cubierta verde con manto asfáltico 3.2mm

Fuente: Autores

Para el desarrollo del modelo de optimización no lineal que permitiera determinar cuál de las dos alternativas (*tabla 1* y *tabla 2*) generaría la mayor tasa interna de retorno sobre la inversión; se realizó un flujo de caja el cual representa los costos totales a lo largo de los 20 años de vida útil donde el periodo 0 es el valor de implementación de la cubierta verde y a partir del primer año representan los costos de mantenimientos mínimos requeridos para la cubierta verde y por otra parte los beneficios totales es la retribución económica que genera el proyecto a en este caso eliminar el uso completo del aire acondicionado y el ventilador debido a la reducción de temperatura obtenida como es calculado en la *tabla 5*.

Los flujos de fondo para el escenario de la *tabla 1* son mostrado a continuación:

| DATOS DEL FLUJO DE FONDO | AÑOS | COSTOS TOTALES | BENEFICIOS TOTALES | FLUJO DE FONDOS |
|--------------------------|------|----------------|--------------------|-----------------|
| | | 0 | \$ 14.285.055 | \$ 1.262.250 |
| | 1 | \$ 60.000 | \$ 1.515.024 | \$ 1.455.024 |
| | 2 | \$ 60.000 | \$ 1.515.024 | \$ 1.455.024 |
| | 3 | \$ 60.000 | \$ 1.515.024 | \$ 1.455.024 |
| | 4 | \$ 60.000 | \$ 1.515.024 | \$ 1.455.024 |
| | 5 | \$ 60.000 | \$ 1.515.024 | \$ 1.455.024 |
| | 6 | \$ 60.000 | \$ 1.515.024 | \$ 1.455.024 |

| | | | | | |
|--|--|----|-----------|--------------|--------------|
| | | 7 | \$ 60.000 | \$ 1.515.024 | \$ 1.455.024 |
| | | 8 | \$ 60.000 | \$ 1.515.024 | \$ 1.455.024 |
| | | 9 | \$ 60.000 | \$ 1.515.024 | \$ 1.455.024 |
| | | 10 | \$ 60.000 | \$ 1.515.024 | \$ 1.455.024 |
| | | 11 | \$ 60.000 | \$ 1.515.024 | \$ 1.455.024 |
| | | 12 | \$ 60.000 | \$ 1.515.024 | \$ 1.455.024 |
| | | 13 | \$ 60.000 | \$ 1.515.024 | \$ 1.455.024 |
| | | 14 | \$ 60.000 | \$ 1.515.024 | \$ 1.455.024 |
| | | 15 | \$ 60.000 | \$ 1.515.024 | \$ 1.455.024 |
| | | 16 | \$ 60.000 | \$ 1.515.024 | \$ 1.455.024 |
| | | 17 | \$ 60.000 | \$ 1.515.024 | \$ 1.455.024 |
| | | 18 | \$ 60.000 | \$ 1.515.024 | \$ 1.455.024 |
| | | 19 | \$ 60.000 | \$ 1.515.024 | \$ 1.455.024 |
| | | 20 | \$ 60.000 | \$ 1.515.024 | \$ 1.455.024 |

Tabla 3 - Flujos de fondo a lo largo de los 20 años de vida útil del proyecto con impermeabilización

Sika

Fuente: Autores

En los flujos de fondo anteriormente para el periodo 0 se generan unos beneficios totales de \$1'262.024 el cual es diferente con los demás periodos debido a que el tiempo estimado del montaje de la cubierta es de tan solo 2 meses y los periodos restantes para completar el año se generan beneficios económicos por no usar el aire acondicionado ni tampoco el ventilador.

Para el escenario de la **tabla 3** con los respectivos flujos de fondo mostrados anteriormente, se genera un VAN representado por medio de la siguiente ecuación el cual será usado tanto para el cálculo de la TIR por el método de Newton-Raphson como por el método de tanteos:

$$VAN_i = -13055535 + \frac{1'455.024}{(1+i)^1} + \frac{1'455.024}{(1+i)^2} + \frac{1'455.024}{(1+i)^3} + \frac{1'455.024}{(1+i)^4} + \frac{1'455.024}{(1+i)^5} + \frac{1'455.024}{(1+i)^6} + \frac{1'455.024}{(1+i)^7} + \dots + \frac{1'455.024}{(1+i)^{20}}$$

(Ecuación 49)

Como el ciclo de vida útil del proyecto de la construcción de la cubierta verde extensiva es de 20 años, entonces los costos como beneficios totales son planteados a lo largo de todos los periodos.

En el caso de implementar la cubierta con la opción más económica (manto asfáltico) genera los flujos de caja mostrados a continuación los cuales serán usados posteriormente en el cálculo de la Tasa Interna de Retorno TIR:

| DATOS DEL FLUJO DE FONDO | AÑOS | COSTOS TOTALES | BENEFICIOS TOTALES | FLUJO DE FONDOS |
|--------------------------|------|----------------|--------------------|-----------------|
| | | 0 | \$ 10.679.934 | \$ 1.262.520 |
| | 1 | \$ 60.000 | \$ 1.515.024 | \$ 1.455.024 |
| | 2 | \$ 60.000 | \$ 1.515.024 | \$ 1.455.024 |
| | 3 | \$ 60.000 | \$ 1.515.024 | \$ 1.455.024 |
| | 4 | \$ 60.000 | \$ 1.515.024 | \$ 1.455.024 |
| | 5 | \$ 60.000 | \$ 1.515.024 | \$ 1.455.024 |
| | 6 | \$ 60.000 | \$ 1.515.024 | \$ 1.455.024 |
| | 7 | \$ 60.000 | \$ 1.515.024 | \$ 1.455.024 |
| | 8 | \$ 60.000 | \$ 1.515.024 | \$ 1.455.024 |
| | 9 | \$ 60.000 | \$ 1.515.024 | \$ 1.455.024 |
| | 10 | \$ 60.000 | \$ 1.515.024 | \$ 1.455.024 |
| | 11 | \$ 60.000 | \$ 1.515.024 | \$ 1.455.024 |
| | 12 | \$ 60.000 | \$ 1.515.024 | \$ 1.455.024 |
| | 13 | \$ 60.000 | \$ 1.515.024 | \$ 1.455.024 |
| | 14 | \$ 60.000 | \$ 1.515.024 | \$ 1.455.024 |
| | 15 | \$ 60.000 | \$ 1.515.024 | \$ 1.455.024 |
| | 16 | \$ 60.000 | \$ 1.515.024 | \$ 1.455.024 |
| | 17 | \$ 60.000 | \$ 1.515.024 | \$ 1.455.024 |
| | 18 | \$ 60.000 | \$ 1.515.024 | \$ 1.455.024 |
| | 19 | \$ 60.000 | \$ 1.515.024 | \$ 1.455.024 |
| | 20 | \$ 60.000 | \$ 1.515.024 | \$ 1.455.024 |

Tabla 4 - Flujos de fondo con la implementación de la opción económica

Fuente: Autores

En este último escenario, se genera una ecuación del VAN como se muestra a continuación:

$$VAN_i = -9417414 + \frac{1'455.024}{(1+i)^1} + \frac{1'455.024}{(1+i)^2} + \frac{1'455.024}{(1+i)^3} + \frac{1'455.024}{(1+i)^4} + \frac{1'455.024}{(1+i)^5} + \frac{1'455.024}{(1+i)^6} + \frac{1'455.024}{(1+i)^7} + \dots + \frac{1'455.024}{(1+i)^{20}}$$

(Ecuación 50)

Por otra parte, la estimación de los beneficios totales anuales generados gracias a la implementación de la cubierta verde extensiva fue calculados con base en un consumo promedio de 4 horas diarias por mes del aire acondicionado de la habitación objeto de estudio y un promedio de 10 horas diarias del ventilador que también se encuentra en el interior de esta.

Los detalles del cálculo del beneficio anual detallado periodo tras periodo presentados tanto en la *tabla 3* como en la *tabla 4* se muestran a continuación:

| AIRE ACONDICIONADO | | |
|---|---------------------|-------|
| Consumo AC por HORA | 1,95 | kW |
| Tiempo de uso | 4 | horas |
| Días uso | 7 | días |
| Consumo mensual Aire Acondicionado (kW) | 218,4 | |
| Tarifa \$/kWh vivienda | 540 | |
| Beneficio mensual CVE | \$ 117.936 | |
| VENTILADOR | | |
| Consumo AC por HORA | 0,055 | kW |
| Tiempo de uso | 10 | horas |
| Días uso | 7 | días |
| Consumo mensual AC (kW) | 15,4 | |
| Tarifa \$/kWh | 540 | |
| Beneficio mensual CVE | \$ 8.316 | |
| Beneficio mensual total CVE | \$ 126.252 | |
| Beneficio total anual CVE | \$ 1.515.024 | |

Tabla 5 - Cálculo de beneficios totales de la cubierta verde extensiva**Fuente:** Autores

Luego de la obtención de los flujos de fondo, se continuó con el cálculo de la TIR por medio del método de tanteos el cual comprende en realizar tantas iteraciones como sea posible en las dos ecuaciones descritas anteriormente de modo que se pueda calcular el interés y de esta manera obtener el valor presente neto del proyecto.

En el escenario de la aplicación de la TIR con Sika (**tabla 3**) se obtiene la siguiente tabla de iteraciones hasta que se determine la rentabilidad del proyecto a lo largo de la vida útil:

| i (%) | VAN (\$) |
|---------------|-------------------|
| 25,0% | -\$ 7.269.540,138 |
| 22,7% | -\$ 6.719.877,989 |
| 17,0% | -\$ 4.833.998,459 |
| 15,0% | -\$ 3.915.057,482 |
| 13,0% | -\$ 2.801.352,860 |
| 11,0% | -\$ 1.435.701,469 |
| 10,0% | -\$ 635.095,462 |
| 9,30% | -\$ 19.426,868 |
| 9,278% | \$ 0,000 |

Tabla 6 - Determinación de la TIR con la ecuación 7 por el método de tanteos**Fuente:** Autores

Ahora bien, con los flujos de fondo presentados en la **tabla 4** y la ecuación 50 se generan iteraciones hasta determinar la rentabilidad del proyecto en caso de adquirirse los elementos de empresas locales (CENTIMP) y a aplicación del manto asfáltico como impermeabilización:

| i (%) | VAN (\$) |
|--------------|-------------------|
| 40,00% | -\$ 5.784.201,599 |
| 35,00% | -\$ 5.270.485,735 |
| 30,00% | -\$ 4.592.854,070 |
| 25,00% | -\$ 3.664.419,138 |
| 20,00% | -\$ 2.332.058,618 |

| | |
|---------------|-------------------|
| 17,00% | -\$ 1.228.877,459 |
| 15,00% | -\$ 309.936,482 |
| 14,90% | -\$ 259.284,522 |
| 14,40% | -\$ 0,001 |

Tabla 7 - Determinación de la TIR con la ecuación 8 por el método de tanteos

Fuente: Autores

Cabe señalar que, para generar un mayor grado de confiabilidad en el proyecto, también se realizó el cálculo de la rentabilidad con la fórmula planteada por medio del algoritmo de Newton-Raphson el cual ya fue verificada previamente por el método de tanteos tal cual como lo hace (Benavides, 2007).

Partiendo la ecuación general del VAN por el método de Newton-Raphson presentada a continuación:

$$I_{j+1} = I_j - \frac{VAN(I_j)}{van'(I_j)} \quad (\text{Ecuación 51})$$

Ilustración 43 – Ecuación general con la que el VAN se hace cero por medio del método de Newton-Raphson

Fuente: Autores

Donde:

I_j = Valor impuesto de la tasa

$VAN(I_j)$ = VAN calculado con la tasa impuesta (I_j)

$Van'(I_j)$ = Primera derivada de la ecuación del VAN con respecto de la tasa

Con base en la ilustración 43 (ecuación 51), se obtienen tanto para para la ecuación 49 como para la ecuación 50 las primeras derivadas de cada una con respecto a la tasa de interés tal como lo indica el método:

$$van'_{(i)} = -\frac{1'455.024}{(1+i)^2} - \frac{2'910.048}{(1+i)^3} - \frac{4'365.072}{(1+i)^4} - \frac{5'820.096}{(1+i)^5} \\ - \frac{7'275.120}{(1+i)^6} - \frac{8'730.144}{(1+i)^7} \dots - \frac{29'100.480}{(1+i)^{21}}$$

(Ecuación 52)

Es de aclarar que como el flujo de fondos en el periodo cero (0) es una constante, esto hace que los demás términos (fraccionarios) sean iguales para ambos casos, por tanto, se plantea una sola fórmula de la primera derivada tanto para la ecuación 49 como para la ecuación 50.

Con base en las ecuaciones 49 y 51 se obtiene la siguiente tabla con la estructura tal como lo dice el método de Newton-Rapshon:

| I (j) | VAN | van ' | I (j+1) | Variación (Delta) |
|-------------|----------------------|------------------------|-------------|-------------------|
| 30,000000% | -\$ 8.197.975,070 | -\$ 14.604.523,257 | -26,133123% | |
| -26,133123% | \$ 2.361.997.125,810 | -\$ 55.529.653.137,613 | -21,879545% | 4,2535780% |
| -21,879545% | \$ 908.303.058,289 | -\$ 19.563.153.685,646 | -17,236618% | 4,6429276% |
| -17,236618% | \$ 349.774.917,993 | -\$ 6.846.228.206,090 | -12,127601% | 5,1090163% |
| -12,127601% | \$ 134.217.441,387 | -\$ 2.387.849.607,058 | -6,506752% | 5,6208499% |
| -6,506752% | \$ 50.497.468,677 | -\$ 844.516.021,579 | -0,527295% | 5,9794566% |
| -0,527295% | \$ 17.753.360,964 | -\$ 319.690.466,503 | 5,026002% | 5,5532970% |
| 5,026002% | \$ 5.070.369,215 | -\$ 146.351.974,273 | 8,490505% | 3,4645035% |
| 8,490505% | \$ 756.372,262 | -\$ 95.124.304,394 | 9,285646% | 0,7951409% |
| 9,285646% | -\$ 6.286,997 | -\$ 86.677.384,993 | 9,278393% | -0,0072533% |
| 9,278393% | \$ 361,084 | -\$ 86.750.100,067 | 9,278809% | 0,0004162% |

Tabla 8 - Estimación de la TIR por Newton-Rapshon para la opción de componentes Sika

Fuente: Autores

Por último, se realiza el procedimiento para la estimación de la TIR por el método de Newton-Rapshon teniendo en cuenta las ecuaciones 50 y 51, las cuales fueron calculadas con los flujos de fondo de la tabla 4 en donde la impermeabilización es el manto asfáltico de 3.2mm.

| I (j) | VAN | van ' | I (j+1) | Variación (Delta) |
|---------|----------------------|-------------------------|---------|-------------------|
| -30,00% | \$ 6.064.116.070,029 | -\$ 154.028.057.790,864 | -26,06% | |
| -26,06% | \$ 2.327.109.355,030 | -\$ 54.546.669.334,887 | -21,80% | 4,27% |
| -21,80% | \$ 895.872.838,262 | -\$ 19.184.783.358,930 | -17,13% | 4,67% |
| -17,13% | \$ 345.941.648,539 | -\$ 6.685.837.323,330 | -11,95% | 5,17% |
| -11,95% | \$ 133.679.193,523 | -\$ 2.307.563.487,487 | -6,16% | 5,79% |
| -6,16% | \$ 51.201.527,607 | -\$ 795.220.481,439 | 0,28% | 6,44% |
| 0,28% | \$ 18.847.762,853 | -\$ 283.379.640,606 | 6,93% | 6,65% |
| 6,93% | \$ 6.081.286,180 | -\$ 114.893.713,822 | 12,22% | 5,29% |
| 12,22% | \$ 1.300.637,519 | -\$ 62.611.969,566 | 14,30% | 2,08% |
| 14,30% | \$ 54.965,970 | -\$ 50.584.296,530 | 14,41% | 0,11% |
| 14,41% | -\$ 3.345,203 | -\$ 50.041.293,985 | 14,40% | -0,01% |
| 14,40% | \$ 224,235 | -\$ 50.074.478,940 | 14,40% | 0,00% |

Tabla 9 - Estimación de la TIR por Newton-Rapshon para la opción con manto asfáltico

Fuente: Autores

Por último, es de resaltar que el modelo de optimización (no lineal) para el análisis financiero, permitió determinar, entre las alternativas, cuál de estas generaría un mayor interés a lo largo de la vida útil del proyecto sobre la inversión realizada por parte de los financiadores y a su vez estimar los componentes de la estructura a comprar y los cuales definirían la composición de las ecuaciones que conforman el modelo matemático presentado en la siguiente sección.

.12. Implementación de modelo en el lenguaje de programación R

Para las simulaciones de las temperaturas internas, se aplicó el modelo en el lenguaje R donde, se definieron las diferentes componentes constructivos de estructura de cubierta verde (vegetación, sustrato, capa filtrante, entre otros); para ello se importaron datos de la estación meteorológica del ICP por medio de paquetes disponibles en dicho lenguaje y a su vez se tuvo en cuenta las alternativas con mayor rendimiento económico analizadas previamente.

Los términos y procesos involucrados en las modelaciones de esta investigación se describen paso a paso a continuación y como último recurso se muestra el diagrama de flujo que describe la secuencia de manera organizada del código adaptado de diferentes autores que han desarrollado también este tipo de investigación. [Para un detalle preciso de inicio a fin del modelo empleado en R dirigirse al Anexo 24 y 25]

EXPLICACIÓN DE VARIABLES DE ENTRADA

- Instalación de paquetes para importar los datos a Excel – `install.packages("readxl")`
- Lectura de datos del paquete antes instalado – `library(readxl)`
- Búsqueda de ubicación del archivo en el computador – `ruta_excel`

Luego de contar con la importación y lectura de datos en RStudio por medio de los paquetes antes mencionados, se procede a establecer las diferentes entradas y procesos con sus respectivos valores y fórmulas junto al autor que se tomó de base y todo esto con la finalidad de la simulación de la temperatura interna de la habitación:

Entradas para el proceso de radiación:

- I_s = Radiación de onda corta – solar [w/m^2] – Variable obtenida por medio de la estación meteorológica del ICP

- **Mg_medido**= VWC o Contenido volumétrico del agua aproximado – $Mg_medido <- c((Datos_estacion\$`Humedad del suelo VWC (%)`)/100)$
- **VWC_av**= Contenido promedio volumétrico de agua promedio para la cubierta verde en funcionamiento
- $VWC_av <- mean (Mg_medido)$
- **ag**= Albedo del sustrato [%] (Schwarz, 2015)

```

ag <- c()
for (i in 1:y) {

  if (Mg_medido[i] >= 0.5 ) {
    ag[i] <- 0.18
  }
  else if (Mg_medido[i] <= 0.22){
    ag[i] <- 0.13
  }
  else (ag[i] <- 0.155)
  }
print(ag)

```

- **a_f**= Albedo del follaje [%] = 0.18 – (Frankenstein & Koenig, 2004b; Schwarz, 2015)
- **ε_g**= Emisividad del sustrato, valor entre 0.92 y 0.97 (Frankenstein & Koenig, 2004b)
- **F_{tg}**= $(1-(0.0016*((298-T_g)^2)))$ – (Frankenstein & Koenig, 2004b)
- **ε_f**= Emisividad del follaje = $(0.90 + (F_{tg} * (0.96-0.90)))$ - (Frankenstein & Koenig, 2004b)
- **S**= Constante de Stefan Boltzman $(5.6704 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)$ – (Cengel & Boles, 2012)
- **SAI**= Índice de área de tallo (Dickinson et al., 1986)
- **LAI**= Índice de área foliar calculado de manera experimental = 2.77 – Se cálculo por medio de fotometría tal como lo realiza (Konkov, 2018)
- **S_f**= 0.57 Cobertura fraccional de la vegetación esperada – Calculada analíticamente (Autores)
- **L_g**= 0.1 = Espesor del sustrato – perlita, hummus de lombriz y tierra negra (Autores, 2021)

- **ks**= Coeficiente de extinción = 1 – (Tabares-Velasco & Srebric, 2011)
- **tr_plants**= Transmitancia de la radiación termica, radiación que pasa a través del follaje (Onda larga) = 0.0755 – (Konkov, 2018)

Entradas de convección (calor sensible)

- **e0**= Coeficiente de transferencia de calor sensible en ausencia de viento para reflejar la convección natural debido al gradiente de temperatura = $2 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]}$ – (Konkov, 2018)
- **cp_a**= Calor específico del aire a presión constante = $1005.6 \text{ [J/kg} \cdot \text{k]}$ – (Cengel & Boles, 2012)
- **z_f**= Altura de las plantas = 0.1 [m] (Autores, 2021)
- **k_v**= Constante de Karman (0.4) (Frankenstein & Koenig, 2004b)
- **Z_a**= Altura del sensor de temperatura = 2 [m] – (Konkov, 2018)
- **W**= Velocidad de la estación meteorológica del ICP, valor mínimo 2m/s [m/s]

```
W <- c(Datos_estacion$`Velocidad del viento W (m/s)`)
w1 <- length(W)
```

```
w_real <- c()
for (i in 1:w1) {
  if (W[i] < 2) {
    W_real[i] <- 2
  }
  else if (W_real[i] <- W[i]){
  }
}
print(W_real)
```

- **r_{ch}**= Número de Schmidt = 0.63 (Konkov, 2018)
- **Z_{o_g}**= Longitud de rugosidad del sustrato = 0.001 [m] – (Frankenstein & Koenig, 2004b)
- **g**= Aceleración de la gravedad ($\approx 9.80665 \text{ m/s}^2$) (Cengel & Boles, 2012)
- **Patm**= Presión atmosférica estándar [kPa] - De acuerdo con (Cengel & Boles, 2012) es de 101325kPa.
- **M**= Masa molar del aire = 28.97 [Kg/kmol] (Cengel & Boles, 2012)

- **R**= Constante universal de los gases ideales = 8.31447 [kPa*m³/kmol*K] (Cengel & Boles, 2012)
- **h_{air}**= Coeficiente de transferencia de calor por convección libre o natural del aire = 11.35 [W/(m² K)]
- **C_{p_w}**= Calor específico del agua = 4179 [J/m*K]
- **C_{p_substrate}**= Calor específico teniendo en cuenta como valor máximo el calor específico de la materia orgánica = 2470 y mínimo el calor específico de la perlita = 837 ; ambos presentes en el caso de estudio = 1653.5 [J/m*K]

Entradas de convección (calor latente)

- Coeficientes para el cálculo de presión de vapor (Frankenstein & Koenig, 2004b):
 - $a_w = 17.269$
 - $a_i = 21.8745$
 - $b_w = 35.86$
 - $b_i = 7.66$
- **RH**= Humedad relativa = 1.0 (Frankenstein & Koenig, 2004b)
- **P**= Precipitación zonas de interés [mm] – Obtenida por medio de la estación meteorológica
- **Mg**= Factores de humedad de suelo – Registrada con los equipos de medición de Arduino
- **ea₀**= Presión de vapor de saturación a 0°C = 610.78 [kPa] (Frankenstein & Koenig, 2004b)
- **r_{s_min}**= Resistencia estomática mínima (700 s/m) (Tabares-Velasco & Srebric, 2011)
- **Mc_{root}**= Contenido de agua volumétrico promedio en la zona de la raíz = 0.001 (Vera et al., 2017)
- **Mc_{min}**= Contenido de agua volumétrico mínimo o residual = 0.001 (Vera et al., 2017)

- **Mc_{max}**= Contenido de agua volumétrico máximo o residual = 0.50 (Vera et al., 2017)
- **rce**= Número de Prandtl para flujo turbulento = 0.71 (Cengel & Boles, 2012)
- **i_{fg}**= Entalpía de vaporización del agua = 2256.5 [kJ/Kg] – (Cengel & Boles, 2012)
- **c= Resistencia del suelo a la evaporación** (Ayata et al., 2011)
 $c1 <- (0)$
 $c2 <- (34.5)$
 $c3 <- (-3.3)$
- **Gp= Densidad del agua** (Cengel & Boles, 2012)
 $Gp <- c(997) [Kg/m^3]$
- **ra**= Resistencia aerodinámica = 143 [s/m] – (Tabares-Velasco & Srebric, 2011)

Entradas para el proceso de conductividad

- **k_{g1}**= Conductividad del sustrato (humus de lombriz, perlita y tierra negra de cultivo) = 0.208 [w/m*k] (Vera et al., 2017)
- **k_g**= Conductividad del sustrato – suelo constituido principalmente por arcilla expandida (Vera et al., 2017) = $(0.2)+((1.4)*(Mg_medido))$
- **k_{filt}**= Conductividad capa filtrante – geotextil no tejido 1600 = 0.14 [w/m*k] (Guerra Sache & Jaramillo Villacías, 2015)
- **k_{drain}**= Conductividad capa anti-raíz = 0.285 [w/m*k] (Guerra Sache & Jaramillo Villacías, 2015)
- **k_{anti}**= Conductividad Capa anti-raíz - Manto Poliéster 40 Anti-Raíz (Martínez, 2016) [W/ (m *K)] = 0.275 [W/ (m *K)]

- **k_imp**= Conductividad Capa impermeabilizante - Manto asfáltico = 0.692 [W/ (m * k)] – (Martínez Segovia, 2015)
- **k_roof**= Conductividad Cubierta actual - Machimbre Pino cipres = 0.104 [W/(m * k)] – (Norma Chilena Oficial NCh. 853, 1991)
- **L_g**= Espesor Capa sustrato = 0.1 [m] – Escogido por (Autores, 2021)
- **L_filt**= Espesor Capa filtrante, Geotextil no tejido 1600 = 0.001 [m] – (Sika, 2018)
- **L_drain**= Espesor capa drenante = 0.008 [m] – (Sika, 2019)
- **L_anti**= Espesor capa anti-raíz – manto poliéster 40 anti-raíz = 0.0012 [m] –
- **L_imp**= Espesor Capa impermeabilizante = 0.0032 [m] – (Sika, 2011)
- **L_roof**= Espesor Cubierta actual - Machimbre Pino cipres = 0.007 [m] – Medido directamente en la estructura por los autores
- **T_top**= Temperatura en la superficie del sustrato (Termocupla con Arduino) [K] temporalmente tiene valor de entrada Tg pero corresponde a la termocupla en la superficie del sustrato

Cálculos para complementar las entradas de Convección (calor sensible)

1. **Taf**= Temperatura en la sección aire-follaje [k] (Konkov, 2018)

$$Taf <- c(((1 - Sf) * Ta) + (Sf * ((0.3 * Ta) + (0.6 * Tf) + (0.1 * Tg))))$$
2. **d_af**= Densidad del aire cerca al follaje y al sustrato calculado con la Ley de los Gases Ideales [kg/m³]

$$d_af <- c((Patm * M) / (R * Tf))$$
 - a. $d_ag <- c((Patm * M) / (R * Tg))$
3. **Zo_f**= Longitud de rugosidad de la planta [m] (Frankenstein & Koenig, 2004b)

$$Zo_f <- c(0.131 * (Zf^{0.997}))$$

$$d <- length(Zo_f)$$

```

Zo_freal <- c()
for (i in 1:d) {

  if (Zo_f[i] < 0.02) {
    Zo_freal[i] <- 0.02
  }
  else if (Zo_freal[i] <- Zo_f[i]){
  }

}

print(Zo_freal)

```

4. **Zd**= Altura de desplazamiento cero [m] (Konkov, 2018)

$$Zd <- c(0.701 * (Zf^{0.975}))$$

5. **Chn_f**= Coeficiente de transferencia a granel en la superficie superior del follaje (Konkov, 2018)

$$Chn_f <- c((kv/(\log((Za-Zd)/Zo_freal)))^2)$$

6. **waf**= Velocidad del viento dentro del follaje - Se vuelve W en caso de ausencia de vegetación [m/s]

$$Waf <- c((0.83 * Sf * \sqrt{Chn_f} * W_real) + ((1 - Sf) * W_real))$$

7. **waf1**= Velocidad del viento dentro del follaje - considerando el escenario 1 donde Sf = 1 [m/s]

$$Waf1 <- c((0.83 * \sqrt{Chn_f} * W_real))$$

Waf1

8. **Cf**= Coeficiente de transferencia a granel para el flujo de aire dentro del follaje [s/m]

$$Cf <- c(0.01 * (1+(0.3/Waf)))$$

9. **Chn_g**= Coeficiente de transferencia a granel cerca de la superficie del sustrato

$$Chn_g <- c(((kv/(\log((Za-Zd)/Zo_g)))^2)/rch)$$

10. **Rib**= Número de Richardson

$$Rib <- c((2 * g * Za * (Taf - Tg))/(Waf^2*(Taf + Tg)))$$

11. **Ga**= Valor Gama para determinar el coeficiente de transferencia del flujo de calor sensible al granel para el medio de crecimiento (sustrato)

```
for (j in 1:m) {

  if (Rib[j] < 0) {
    Ga[j] <- (1 - ((9.4 * Rib[j]) / sqrt(1 + 7.4 * Chn_g * 9.4 * sqrt(Za/Zo_g) * abs(Rib[j]))))
  } else if (Rib[j] == 0) {
    Ga[j] = 1
  } else {
    Ga[j] <- (1 / (1 + (4.7 * Rib[j])^2))
  }
}
print(Ga)
```

12. **Ch_g1**= Factor de corrección para la estabilidad del intercambio de calor sensible del suelo lleno de vegetación, sf= 1

```
Ch_g1 <- c(Ga * (Chn_f))
```

13. **hf1**= Coeficiente del flujo de transferencia de calor sensible, follaje [W/m² * K]

```
hf <- c((1.5 * LAI * d_af * cp_a * Cf * Waf1))
```

14. **hf_McAdam's**= Coeficiente del flujo de transferencia de calor sensible, follaje [W/m² * K] (Ayata et al., 2011)

```
hf_mcadams <- 5.9 + ((4.1 * W_real) * ((511 + 294) / (511 + Ta)))
```

15. **hg1**= Coeficiente del flujo de transferencia de calor sensible, sustrato lleno de vegetación [W/m² * K], es decir, sf= 1

```
hg1 <- hg1 <- c((d_ag * cp_a * Ch_g1 * Waf1))
```

16. **Hf_1**= Flujo de calor sensible follaje [W/m²] (Ayata et al., 2011)

```
Hf <- Hf_1 <- c(hf1 * (Tf - Ta))
```

17. **Hg_2**= Flujo de calor sensible sustrato [W/m²] (Ayata et al., 2011)

$$H_g <- c(h_g * (T_g - T_a))$$

Calor convectivo según (Tabares-Velasco & Srebric, 2011)

18. **k_por**= Conductividad del medio de crecimiento

$$k_{por} <- ((0.85 * 0.5) + ((1 - 0.85) * 0.5))$$

19. **a_por**= Difusividad térmica

$$a_{por} <- (k_{por} / (1 * c_p_{substrate}))$$

20. **Pe**= Número de Péclet

$$Pe <- c((0.3 * W_{real} * L_g) / a_{por})$$

21. **Nu**= Número de Nusselt de acuerdo con la relación con el número de Peclet

$$Nu <- c(1.128 * (Pe^{0.5}))$$

22. **Q_convection_plants**= Transferencia de calor convectivo en el follaje

$$Q_{convection_plants} <- (Hf_1)$$

$$Pe <- c((Nu / 1.128)^2)$$

$$h_{por} <- c((k_{por} * 1.128 * (Pe^{0.5})) / L_g)$$

$$h_{sub} <- ((h_{por} * hf1) / (h_{por} + hf1))$$

$$Q_{convection_substrate_cov} <- c(h_{sub} * (T_g - T_a))$$

Cálculos para complementar las entradas de Convección (calor sensible)

23. **e_a1**= Presión de vapor aire (Frankenstein & Koenig, 2004b) [Pa]

$$e_{a1} <- c(e_{a0} * RH * \exp((a_w * (T_a - 273.16)) / (T_a - b_w)))$$

24. **e_f1**= Presión de vapor follaje (Frankenstein & Koenig, 2004b) [Pa]

$$e_{f1} <- c(e_{a0} * RH * \exp((a_w * (T_f - 273.16)) / (T_f - b_w)))$$

25. **e_g1**= Presión de vapor sustrato (Frankenstein & Koenig, 2004) [Pa]

```
e_g1 <- c(ea_0 * RH * exp((a_w * (Tg - 273.16)) / (Tg - b_w)))
```

Resistencia stomatal (Frankenstein & Koenig, 2004b)

26. **ra**= Resistencia a la difusión de vapor atmosférica y de las plantas [s/m]

```
ra<- c(1/(Cf * Waf))
```

27. **f_suncalculdo**= Función de la disponibilidad de humedad en la raíz de la planta

```
f_suncalculado <- c(((0.004 * Is) + 0.005) / (0.81 * ((0.004 * Is) + 1)))
```

```
l <- length(f_suncalculado)
```

```
f_sun <- c()
```

```
for (k in 1:l) {
```

```
  if (f_suncalculado[k] < 1 ) {
    f_sun[k] <- f_suncalculado[k]
  } else if (f_suncalculado[k] == 1) {
    f_sun[k] <- 1
```

```
  }else {
    f_sun[k] <- 1
```

```
  }
}
print(f_sun)
```

28. **f_mc**= Función de la disponibilidad de humedad en la raíz de la planta

```
f_mc <- c((MC_root - MC_min) / (MC_max - MC_min))
```

29. **rs_calculado**= Resistencia estomatal

```
rs_calculado<- c((rs_min/LAI) * 1/(f_sun) * 1/(f_mc))
```

```
r1 <- length(rs_calculado)
```

```
rs1 <- c()
```

```
for (i in 1:r1) {
```

```
  if (rs_calculado[i] > 1125 ) {
    rs1[i] <- 1125
  }
```

```

else if (rs1[i] <- rs_calculado[i]){
}

}

print(rs1)

```

30. **rt**= Relación de humedad en la superficie del follaje

```
rt <-c( ra/(ra + rs1))
```

Resistencia stomatal (Tabares-Velasco & Srebric, 2011)

31. **F_SOLAR** <- c(1+ exp((-0.034)*(Is - 3.5)))

32. **F_VPD** <- c(1/(1 - (0.41 * log((e_f)-(e_a)))) #

33. **F_TEMP** <- c(1/(1 - (0.0016 * (35 - (Tf - 273.15))^2)))

```
F_VWC <- c()
```

```
q <- length(Mg_medido)
```

```
for (i in 1:q) {
```

```
  if (Mg_medido[i] > (0.7 * 0.34)) {
```

```
    F_VWC[i] <- 1
```

```
  } else if (Mg_medido[i] < 0.02) {
```

```
    F_VWC[i] <- 1000
```

```
  }else {
```

```
    F_VWC[i] <- ((0.7 * 0.34) - 0.02) / (Mg_medido[i] - 0.02)
```

```
  }
```

```
}
```

```
print(F_VWC)
```

```
rs <- (rs_min / LAI) * (F_SOLAR) * (F_VPD) * (F_TEMP) * (F_VWC)
```

```
rs
```

Cálculos conductividad

34. **R_n**= Resistencia térmica total del sistema en serie [(m² * K) / W]

```
R_n1 <- c(L_g / k_g)
```

```
R_n2 <- c(L_filt / k_filt)
```

$$R_{n3} <- c(L_{drain} / k_{drain})$$

$$R_{n4} <- c(L_{anti} / k_{anti})$$

$$R_{n5} <- c(L_{imp} / k_{imp})$$

$$R_{n6} <- c(L_{roof} / k_{roof})$$

$$R_n <- (R_{n1} + R_{n2} + R_{n3} + R_{n4} + R_{n5} + R_{n6})$$

35. **U**= Coeficiente total de transferencia por conducción [$W / (m^2 * K)$]

$$U <- c(1/(R_n))$$

Modelo Tabares cubierta verde sin vegetación

Entradas y ecuaciones balance de energía escenario cubierta sin vegetación

36. **Rsh_abs**= Radiación de onda corta absorbida por el follaje

$$Rsh_abs <- c((1 - ag) * Is)$$

37. **Q_s_1**= Transferencia de calor convectivo (sensible) entre la superficie del sustrato y el aire circundante [W/m^2]

$$Q_{s_s_1} <- (Hg_2)$$

Transferencia de calor por Evaporación (latente) en sustrato

38. **pp**= Constante psicométrica

$$pp <- c((cp_a * Patm)/(0.622 * i_{fg}))$$

39. **r_substrate** <- c(c1 + (c2*(((VWC_av/MC_max)^(c3))))))

40. **Q_E**= Transferencia de calor por Evaporación en el sustrato

$$Q_E <- c(((Gp * cp_a)/(pp * (r_substrate + ra))) * ((e_g - e_a)))$$

$$Q_E$$

41. **T_sky**= Temperatura del cielo el cual también se puede tomar como $T_a - 20^\circ C$

$$T_sky <- T_a$$

42. **Q_IR** = Flujo de calor por radiación de onda larga entre el suelo y el sustrato [W/m²]

$$Q_IR <- c(eg * S * ((Tg)^4 - (T_sky)^4))$$

Modelo Tabares cubierta verde con vegetación

Entradas y ecuaciones balance de energía del follaje para el escenario de cubierta con vegetación

43. **tr_solar**= Transmitancia de onda corta del follaje

$$tr_solar <- (exp((-ks * LAI)))$$

44. **R_sh_abs_plants**= Radiación de onda corta absorbida por el follaje

$$R_sh_abs_plants <- c((1 - af - tr_solar) * (1 + (tr_plants * ag)) * (Is))$$

45. **Q_T**= Transferencia de calor (latente) por transpiración de la planta

$$Q_T <- c((LAI) * ((Gp * cp_a)/(pp * (rs + ra))) * ((e_f - e_a)))$$

46. **Q_IR_PLANTS_SKY**= Radiación térmica entre el cielo, las plantas y el sustrato

$$Q_IR_PLANTS_SKY <- ((1 - tr_plants) * (ef) * (S) * ((Tf^4) - (Ta^4)))$$

47. **Q_film_plants**= Transferencia de calor entre plantas y el ambiente circundante

$$Q_film_plants <- c(Q_IR_PLANTS_SKY + Q_convection_plants + Q_T)$$

48. **Q_IR_S_P**= Transferencia de calor entre la capa vegetal y la superficie del sustrato por radiación de onda larga

$$Q_IR_S_P <- c((1 - tr_solar) * (S * ((Tf)^4 - (Tg)^4) / ((1/eg) + (1/ef) - (1))))$$

Entradas y ecuaciones balance de energía del sustrato para el escenario de cubierta con vegetación

49. **R_sh_abs_substrate**= Radiación de onda corta absorbida por el sustrato

$$R_sh_abs_substrate <- c((tr_solar) * (1 - ag) * (Is))$$

50. $Q_{s_s_2}$ = Transferencia de calor convectivo entre la superficie del sustrato y el aire circundante [W/m²]

$$Q_{s_s} <- Q_{convection_substrate_cov}$$

51. $Q_{IR_SUBSTRATE_COV_SKY}$ = Radiación térmica entre el cielo, las plantas y el sustrato

$$Q_{IR_SUBSTRATE_COV_SKY} <- ((tr_plants) * (eg) * (S) * ((Tf^4) - (Ta^4)))$$

Ecuaciones finales para obtención de temperaturas

52. $Temperatura_interna_covered$ = Temperatura interna (machimbre) de acuerdo con el balance de energía para el sustrato considerando vegetación

$$Temperatura_interna_covered <- c(((R_sh_abs_substrate + Q_{IR_S_P} - Q_{convection_substrate_cov} - Q_{IR_SUBSTRATE_COV_SKY} + Q_E) / (-U)) + (Tg))$$

Tg - Temperatura_interna

$$sum(Tg - Temperatura_interna)$$

53. Ti = Temperatura real del machimbre usando análisis en paralelo propuesto por Tabares & Srebric (2011)

$$T_machimbre <- c((Sf * (Temperatura_interna_covered)) + ((1 - Sf) * (Temperatura_interna_bare)))$$

$T_machimbre$

$Tg - T_machimbre$

$$sum(Tg - T_machimbre)$$

54. Q_{cond_bare} = Flujo a través del techo sin vegetación

$$Q_{cond_bare} <- Rsh_abs - Hg + Q_E - Q_{IR}$$

55. **Q_cond_covered**= Flujo a través del techo con vegetación

$$Q_cond_covered \leftarrow R_sh_abs_substrate + Q_IR_S_P - Q_s_s_2 - Q_IR_SUBSTRATE_COV_SKY + Q_E$$

Se considera la transferencia de calor a través del techo como:

$$Q_sustrato \leftarrow c((Sf * (Q_cond_covered)) + ((1 - Sf) * (Q_cond_bare)))$$

Finalmente Se asume el flujo de calor en estado estable a través de estructuras compuestas para determinar la temperatura de la habitación del caso de estudio, por lo que $Q_cond = Q_conv$:

Para esto es necesario considerar como entrada el coeficiente de transferencia de calor por convección libre o natural del aire [W/(m² K)]

*Al considerar aire dentro de la habitación se plantea para el cálculo de la Temperatura de esta la ecuación de calor por convección: $Q_conv = h_air * (T_machimbre - T_cuarto)$*

Por lo que al despejar la variable de interés se tiene:

$$T_cuarto \leftarrow c((Q_sustrato / -h_air) + T_machimbre)$$

T_cuarto

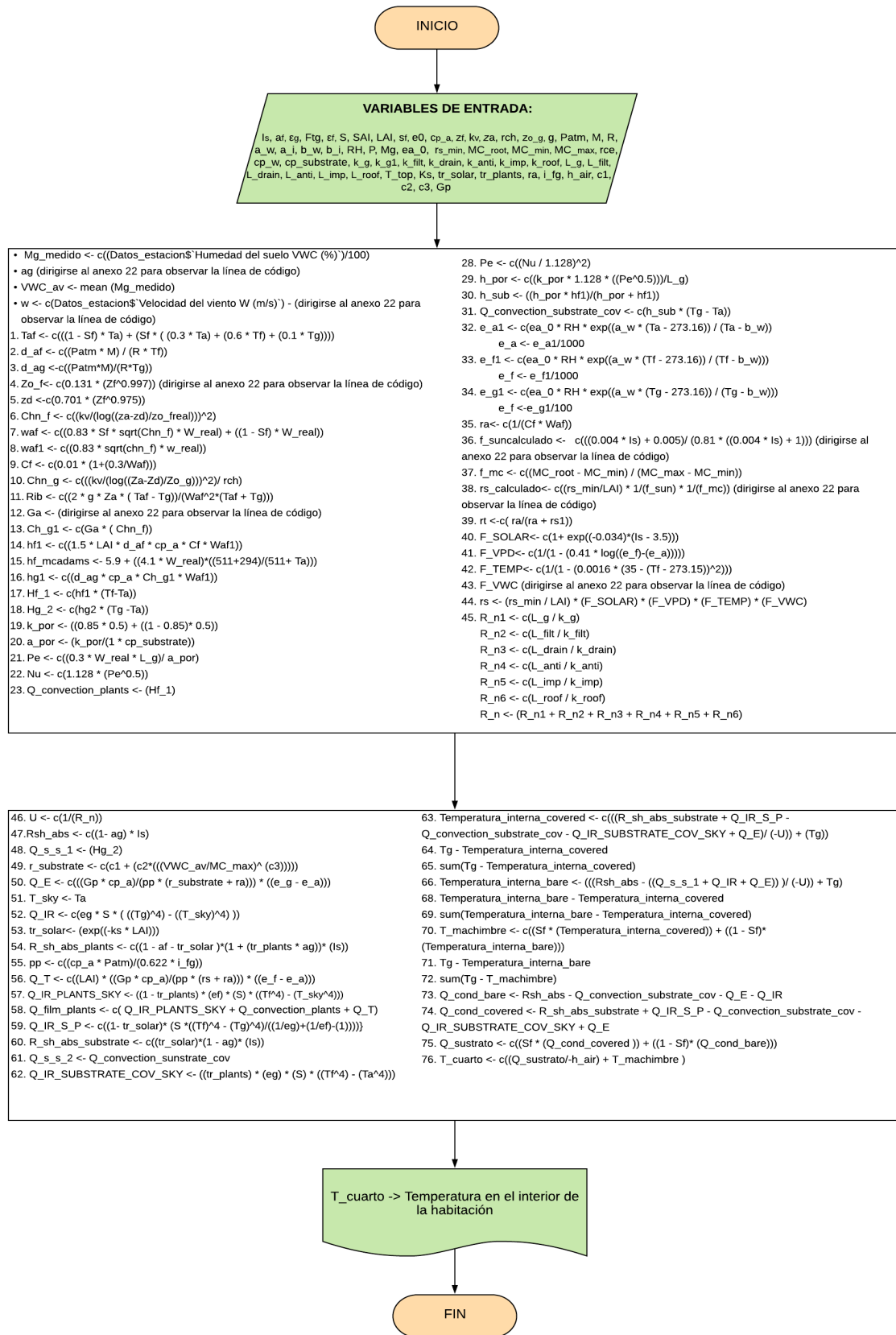


Ilustración 44 - Diagrama de flujo de la simulación de la temperatura interior

Fuente: Autores

.13. Construcción de cubierta verde extensiva

Una vez se adaptaron los diferentes modelos estudiados, incluyendo, el de optimización (no lineal) financiera, con el fin de determinar la mayor Tasa Interna de Rentabilidad a lo largo de la vida útil del proyecto (20 años,) se llevó a cabo la adquisición y compra de los materiales los cuales tuvieran, para las condiciones durante la investigación, las mejores propiedades térmicas con el objetivo de la reducción de la temperatura interna en el interior de la habitación y a su vez que los inversionistas de la cubierta verde pudiesen escoger, con base en métodos analíticos y verificados, la opción con mayor retribución o rentabilidad durante la vida útil de la cubierta verde.

Los materiales fueron adquiridos a través de diferentes empresas en todo el territorio, debido a que en la ciudad de realización del proyecto no se encontraron disponibles puesto que todavía es un tema nuevo en el país y en algunas zonas no se tiene el conocimiento de este por tanto las empresas proveedores de los componentes están solo en ciudades capitales.

El proceso de creación de la cubierta verde inició con el desmonte de todo el tejado existente para aplicación del manto impermeable en el área del techo que alberga la cubierta verde extensiva.

El manto se adhiere a la superficie mediante la aplicación de calor por medio de un soplete a altas temperaturas previo a una limpieza total de cualquier objeto cortopunzante para prevenir que se rasgara el mismo. La siguiente imagen muestra la cubierta existente después de la aplicación del manto por las dos aguas:



Ilustración 45 – Aplicación de manto asfáltico con soplete de calor

Fuente: Propia

Posterior al proceso de aplicación por medio de calor a altas temperaturas, se diseñó la estructura metálica junto con los tubos de aguas negras y las láminas de machimbre de PVC que le dieran soporte al sustrato de la cubierta verde y así evitar el deslizamiento de este junto con la plataforma para cada agua que facilitara el mantenimiento periódico y evitar exponerse a algún riesgo.

Para el marco y seguridad antideslizamiento fue necesario emplear 6 perfiles metálicos 4x1 y 5 tubos de aguas negras de 3/8". Estos elementos se cortaron a las medidas exactas para el diseño y con los ángulos respecto a la horizontal requeridos en el patio de la edificación usando una cortadora tronzoadora de metal de 14" y generando unión entre los elementos por medio de soldadura por arco TIG. Una vez ensamblado los elementos del marco se procedieron a subir al techo y a tomar dimensiones para la obtención de los anchos aferentes o medidas reales internas de lo que sería la cubierta verde tal como se aprecia en la imagen a continuación:



Ilustración 46 - Montaje del marco de protección contra el deslizamiento del sustrato

Fuente: Propia

Para el caso de la plataforma de mantenimiento de la cubierta verde se emplearon dos tubos de metal rectangulares 3x1 para la longitud transversal y tres tubos cuadrados 2x1 para los espaciamientos de 60cm que tiene cada plataforma donde serán situadas tablas (de madera) de modo que una persona pueda apoyarse en las mismas y realizar el respectivo mantenimiento periódico a la cubierta verde y también para instalar los componentes y no tener que apoyarse sobre los mismos.

En la siguiente ilustración se aprecian todos los elementos que facilitarían el trabajo de montaje de todos los elementos de la cubierta verde y a la vez impedirían que el sustrato se deslizara a través del techo:



Ilustración 47 - Instalación de marcos para anclajes y plataforma de la cubierta verde

Fuente: Propia

Las plataformas que se aprecian en la ilustración anterior permitían que los otros componentes como lo son las láminas en machimbre de PVC, el sustrato y las plantas fueran acomodados de una manera más práctica debido a que por la inclinación de la estructura no era sencillo trabajar en ausencia de la plataforma.

Por último se realizó el montaje uno a uno de los componentes de la cubierta verde los cuales comprenden un plástico de base encima del manto asfáltico para protección adicional, una capa drenante en forma de cartón de huevos, una malla geotextil no tejida que cumple la función de filtrar todo el material particulado y evitar que se vaya por los desagües de la

estructura, un espesor de sustrato de 10cm de composición tierra negra, hummus de lombriz y perlita y por último las plantas como medio de vegetación.

El primer paso fue instalar el plástico junto con la lámina drenante y el manto geotextil no tejido los cuales se pegaron con pegante industrial al marco antideslizante para evitar que se movieran de su lugar al adicionar el sustrato tal como se aprecia en la siguiente figura:



Ilustración 48 - Instalación de plástico negro, lámina drenante y geotextil filtrante

Fuente: Propia

Una vez se pegaron las capas al marco, se procedió a realizar los cortes de las láminas de machimbre PVC que impedían el deslizamiento del sustrato, puesto que estas cuentan con alta resistencia a la intemperie y a los factores ambientales. No obstante, se probaron también el cartón plastificado, pero por su baja resistencia a la compresión y a factores medio ambientales se descartó esta alternativa. Luego de realizar esto, se procedió a colocar el sustrato en toda la sección y cumplir con la altura de los 10cm previamente definida por los autores.

La siguiente imagen ilustra el proceso de adición de las combinaciones del sustrato sobre el marco antideslizamiento y en medio de las láminas de PVC:



Ilustración 49 - Adición del sustrato en toda la cubierta

Fuente: Propia

Una vez se adicionó todo el sustrato tanto en medio de las láminas de PVC como en las dos aguas de la cubierta, se plantaron las especies seleccionadas previamente en el prototipo en todo el sustrato y de esta manera obtener la cubierta verde extensiva con el espesor de 10cm establecido previamente.

La siguiente imagen muestra la cubierta instalada con todos los componentes incluyendo las especies de plantas seleccionadas como lo son *Soleirolia Soleirolii* y *Portulaca Grandiflora*:



Ilustración 50 - Instalación de plantas y terminación cubierta verde

Fuente: Propia



Ilustración 51 - Fotografía aérea de la cubierta verde instalada dos semanas posteriores a la fecha del montaje final

Fuente: Autores

Para un detalle cronológico más a fondo en ilustraciones de todos los procesos llevados a cabo para el montaje de los perfiles como refuerzo estructural junto a la construcción, dirigirse desde el *anexo 23* en el capítulo 12 del presente documento.

.14. Instalación de sistema de medición para recolecta de datos finales (Recolección de datos y monitoreo de variables)

Con el propósito de hacer seguimiento a variables necesarias para el proceso de transferencia de calor como la temperatura en la superficie, en el centro y en el fondo del sustrato al igual que la de la hoja y también la humedad o contenido volumétrico de agua, que para este proyecto se consideró como la misma variable como efecto de ausencia del alto costo de los equipos usados por otros autores, se continuó con la construcción de un sistema de medición por medio de componentes electrónicos compatibles con la compañía de entorno de desarrollo integrado (IDE) el cual es de código abierto y muy accesible en cuanto al precio debido a que los equipos usados por diferentes autores para monitoreo de las variables no eran tan económicos por tanto se desarrolló un registrador de temperatura con los componentes disponibles en el mercado hoy día.

Este sistema fue realizado por medio de termocuplas e higrómetros compatibles con el software libre Arduino.

La lista de los elementos utilizados para el montaje del sistema una vez determinada las variables críticas en el modelo de transferencia de calor son las siguientes:

| ELMENTOS SISTEMA DE MEDICIÓN DE HUMEDAD Y TEMPERATURAS CUBIERTA VERDE | | | | | |
|--|--|------------|--------------|--------------------|-----------------|
| ÍTEM | DESCRIPCIÓN | UND | CANT. | V. UNITARIO | V. TOTAL |
| 1 | Conector molex KK 2.54 (header polarizado) hembra (carcasa) de 5 pines | und | 10,00 | \$ 100 | \$ 1.000 |
| 2 | Conector molex KK 2.54 (header polarizado) macho (carcasa) de 5 pines | und | 5,00 | \$ 100 | \$ 500 |

| | | | | | |
|---|--|-----|--------|-----------|-------------------|
| 3 | Conector molex KK 2.54 (header polarizado) hembra (carcasa) de 4 pines | und | 6,00 | \$ 100 | \$ 600 |
| 4 | Conector molex KK 2.54 (header polarizado) macho de 4 pines | und | 3,00 | \$ 100 | \$ 300 |
| 5 | Terminal molex KK 2.54 (header polarizado) para crimpar | und | 100,00 | \$ 50 | \$ 20.000 |
| 6 | Cable plano de 10 hilos tipo dupont | mt | 6,00 | \$ 5.000 | \$ 45.000 |
| 7 | Baquela doble cara universal de 9x15cm | und | 2,00 | \$ 15.000 | \$ 45.000 |
| 8 | Microcontrolador pic16f887 | und | 1,00 | \$ 13.000 | \$ 28.000 |
| 9 | Módulo WIFI ESP8266 | und | 1,00 | \$ 19.500 | \$ 19.500 |
| 10 | Sensor Termocupla Con Max6675 | und | 6,00 | \$ 19.500 | \$ 117.000 |
| 11 | Sensor De Humedad Del Suelo Arduino Modulo HI-69 | und | 6,00 | \$ 6.000 | \$ 36.000 |
| 12 | Caja plástica para aislación de los sensores de 22cm x 18cm x 9cm | und | 1 | \$ 34.000 | \$ 34.000 |
| COSTO TOTAL DE MATERIALES UTILIZADOS PARA MEDICIÓN DE VARIABLES EN LA CUBIERTA VERDE | | | | | \$ 346.900 |

Tabla 10 - Listado de elementos para el sistema de monitoreo de las variables

Fuente: Propia

Después de esto, se solicitaron cotizaciones en empresas proveedores de equipos para medición de variables como es el caso del contenido volumétrico de agua (VWC por sus siglas en inglés), se observó que el costo de tan solo el sensor de medición se oscila entre \$450.000 COP y \$600.000 COP por unidad, es decir, que si se hubiese considerado realizar la adquisición de dos sensores el valor sería superior \$1'000.000 COP tal como se muestra en la siguiente tabla:

| REF | Cant | Descripción | Vlr Unid | Vlr Total |
|-------------------|------|--|------------------|------------------|
| TEROS-10 | 1 | Water Content sensor, 3.5mm plug, 5m cable | 582,000 | 582,000 |
| EC-5 | 1 | EC-5 5cm VWC sensor, 3.5 mm plug, 5m cable | 471,000 | 471,000 |
| SUBTOTAL: | | | 1,053,000 | 1,053,000 |
| IVA (19%): | | | 200,070 | 200,070 |
| TOTAL: | | | 1,253,070 | 1,253,070 |

Tabla 11 - Cotización sensores de medición de contenido volumétrico de agua

Fuente: Propia

Adicional, era necesario la adquisición de un sensor bluetooth para registro y lectura en tiempo real de las variables, pues no solo con la compra de los sensores era suficiente para el almacenamiento del dato, sino que también debe tenerse en cuenta el DataLogger o almacenador de datos que en para el caso cotizado con una empresa distribuidora en Colombia es de \$448.630 COP como se muestra en la siguiente tabla:

| REF | Cant | Descripción | Vlr Unid | Vlr Total |
|-------------------|------|---|----------------|----------------|
| ZSC | 1 | ZSC Bluetooth Sensor Interface for use with ZENTRA Utility Mobile, stereo connector | 377,000 | 377,000 |
| SUBTOTAL: | | | 377,000 | 377,000 |
| IVA (19%): | | | 71,630 | 71,630 |
| TOTAL: | | | 448,630 | 448,630 |

Tabla 12 - Costo sensor bluetooth para registro de datos

Fuente: Propia

Hecha esta salvedad de precios, los cuales estaban fuera del rango del presupuesto proyectado para adquisición de equipos de registro de variables, se realizó la compra de todos los elementos necesarios para el montaje y junto a la ayuda de un Ing. Electrónico se generó el código y el montaje completo de los sensores, conectores, cables, baquelas y demás componentes que integran el sistema.

A continuación, se muestra una imagen de todos los componentes descritos en la **tabla 11** una vez se adquirieron y se ensamblaron:



Ilustración 52 – Adquisición de los componentes del sistema de medición

Fuente: Propia

Todos estos sensores, probados previamente, se subieron al techo junto a la plataforma aislándolos de la temperatura mediante un “Yumbolon metalizado” en aras de que el módulo WiFi el cual es el responsable de la transmisión de datos a la nube de ThingSpeak en tiempo real cada hora no se viera afectado por las altas temperaturas debido a que estaría expuesto de manera constante a las radiaciones ultravioletas.

Estos datos pudieron ser visualizados en tiempo real desde cualquier dispositivo con acceso a internet. En la ilustración mostrada a continuación, se detalla la ubicación de los instrumentos de medición al lado de la cubierta verde para monitoreo de 6 temperaturas y 6 humedades diferentes.



Ilustración 53 - Instalación de equipos de medición en el techo

Fuente: Propia

Conviene subrayar que, las lecturas tanto de los sensores de medición de humedad como de las termocuplas, iniciaron el 9 de junio debido a inconvenientes durante la adaptación y el montaje del sistema, recalcando que en esta fase la cubierta ya se encontraba en funcionamiento

y además, dos termocuplas resultados afectadas por las pruebas preliminares realizadas por los autores.

En adición a lo anterior, solo se obtuvieron datos continuos hasta el día de 16 de junio debido a una fluctuación en el fluido eléctrico a la 1:33am, por lo que después de esta hora todos los sensores se alteraron en sus respectivas mediciones. Es de aclarar que el sistema externo instalado en el techo requiere de evitar dichas variaciones debido a la sensibilidad, en especial, del módulo wifi y de las baquetas de interconexión, para evitar perdida o alteraciones en el funcionamiento de absolutamente todo el sistema.

ACTIVIDADES PARA DESARROLLAR

En la siguiente tabla se describen las actividades de apoyo para el cumplimiento de los objetivos específicos planteados, con sus métodos y alcance. Dicho alcance está direccionado hacia una pregunta de investigación específica para cada actividad, cuya respuesta corresponde al entregable o valor esperado de la misma.

| ACTIVIDADES | MÉTODO | PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN / RESULTADOS ESPERADOS |
|--|---|--|
| Realizar una revisión bibliográfica de las técnicas ya existentes para determinar los factores asociados a diseño, construcción, funcionamiento y costos de una CVE. | Investigación bibliográfica sobre las técnicas existentes para determinar los factores asociados a la construcción de una CVE en general. | ¿Qué evidencias de alternativas de construcción de cubiertas verdes extensivas se encuentran en la literatura? / Casos de alternativas de cubiertas verdes extensivas presentes en la literatura con características similares al caso de estudio. |
| Hacer un análisis de los datos de temperatura de la estación meteorológica de la Facultad de Ingeniería Civil de la UPB, del ICP y los medidos por los dos termómetros instalados en la edificación. | Mediante el lenguaje de programación R se buscará ajustar los datos a un tipo de distribución de probabilidad para analizar el comportamiento de los datos. | ¿Cómo interpretar las temperaturas obtenidas a través la estación meteorológica de la UPB y las registradas por medio de los termómetros instalados? / Gráficas del comportamiento de los datos de la estación y los termómetros instalados en la edificación, ajustados a una distribución de probabilidad determinada. |
| Identificar los factores térmicos determinantes que direccionen la construcción de la CVE. | Mediante un método cualitativo que describa los procesos asociados a la transferencia de calor. | ¿Cuáles son los factores térmicos determinantes en un proceso de transferencia de calor? / Explicación de los diferentes factores asociados al proceso de transferencia de calor. |
| Realizar una caracterización de la | Mediante un método cualitativo descriptivo de | ¿Qué elementos detallados se seleccionarían para llevar a cabo la |

| | | |
|---|---|---|
| <p>cubierta en servicio como de cubiertas vegetales extensivas</p> | <p>los elementos existentes en la cubierta en servicio y los disponibles para la construcción de la CVE.</p> | <p>construcción de una CVE y cuales se seleccionaron para la construcción de la cubierta existente? / Listado de los componentes tanto de la cubierta en servicio como de una CVE con sus respectivas propiedades.</p> |
| <p>Comprobar que la cubierta en servicio cumpla los parámetros estructurales para la implementación de la CVE.</p> | <p>Revisión a los planos estructurales de la cubierta en servicio (Conjunto Calatrava Casa 14) con un análisis estructural para determinar si es o no, necesario algún tipo de reforzamiento estructural.</p> | <p>¿Como determinaría necesaria la implementación de un refuerzo estructural en la cubierta en servicio? / Valores de carga que se encuentren dentro de los límites permisibles conforme al diseño estructural.</p> |
| <p>Formular el comportamiento térmico de los dos escenarios a partir de las variables de transferencia de calor.</p> <p>Plantear un modelo que permita estandarizar la composición de una CVE con relación en las alternativas disponibles en el mercado.</p> | <p>Método cuantitativo descriptivo con el fin de describir los fenómenos generados a partir del proceso de transferencia de calor.</p> <p>Por medio de la relación entre los procesos de transferencia de calor, las alternativas de productos y materiales disponibles en el mercado, los costos asociados a estos y las cargas aportadas por cada elemento de la estructura de CVE.</p> | <p>¿De qué forma se evaluaría la cubierta existente y la CVE con base en los factores asociados en la transferencia de calor? / Demostración del comportamiento térmico para los dos escenarios planteados en el caso de estudio.</p> <p>¿Qué proceso es necesario para llevar a cabo la construcción de una cubierta extensiva con base en las variables físicas asociadas a la transferencia de calor? / Modelo de estandarización apto para diversos escenarios.</p> |
| <p>Elaborar un modelo de simulación numérica para determinar el comportamiento térmico de la cubierta en servicio y de la CVE a construir</p> | <p>A través de los 12 pasos propuestos por (Urquía, 2003) para llevar a cabo una simulación.</p> | <p>¿Podría construirse un modelo que represente el comportamiento térmico el cual se adapte tanto a la cubierta existente cómo a la CVE? / Simulación del comportamiento térmico para los dos escenarios estudiados.</p> |

| | | |
|---|---|---|
| Validar los datos obtenidos con los termómetros, con los obtenidos a partir de la simulación de la cubierta en servicio | Mediante un análisis detallado entre los registros de temperatura de los termómetros y aquellos obtenidos por la simulación para la cubierta en servicio. | ¿Cómo se comprobarían que los datos obtenidos por la simulación hecha de la cubierta en servicio son cercanos a los medidos por los termómetros? / Validación de la simulación por contraste de datos obtenidos con medidas in situ. |
| Diseñar la CVE para un techo con una pendiente de 23°. | Mediante la revisión bibliográfica de los diferentes diseños de cubiertas verdes extensivas | ¿Como combinarías los diferentes factores (térmicos y económicos) asociados a la implementación de una CVE? / Diseño óptimo de una CVE para el caso de estudio |
| Construir la cubierta vegetal extensiva | A través de los conceptos recopilados en las diferentes guías disponibles sobre los métodos constructivos | ¿Cómo se adaptarían los diferentes factores y aspectos identificados y analizados durante la investigación del caso de estudio? / Elemento constructivo adaptado a la cubierta en servicio que cumpla con los requisitos estructurales. |
| Validar de los resultados obtenidos de la simulación con base en los generados de la construcción de la cubierta verde | Mediante un análisis detallado entre los registros de temperatura de los termómetros y aquellos obtenidos por la simulación para la CVE | ¿Cómo comprobaría la idoneidad de los factores involucrados en la simulación? / Aproximación representativa entre los datos medidos in situ y los obtenidos a través de la simulación numérica. |
| Analizar y adaptar el modelo de optimización financiera con base en las condiciones generadas para la implementación de la CVE. | Por medio de los modelos propuestos por Newton Raphson, | ¿Cómo se adaptarían los diferentes factores y aspectos identificados y analizados durante la investigación del caso de estudio? / Elemento constructivo adaptado a la cubierta en servicio que cumpla con los requisitos estructurales. |

Tabla 13 - Actividades de apoyo para el cumplimiento de los objetivos

Fuente: Autores

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el departamento de Santander, lugar donde se desarrolló el proyecto en cuestión, se pudo consultar sobre las diferentes alternativas de materiales a disposición para la implementación de la cubierta verde, sin embargo, solo fue posible cotizar la capa geotextil proveída por la empresa Calypso y de todos modos no estuvo disponible en el momento de comprarla.

Por otro lado, para que otros autores puedan guiarse de los materiales y costos que son distribuidos en Colombia se realizó una caracterización tanto de los diferentes elementos que hacen parte de una cubierta verde extensiva, pero direccionados con el objeto principal de la investigación con la inclusión de elementos metálicos para el marco de seguridad antideslizamiento del sustrato debido a la pendiente de 23° con respecto de la horizontal y también el refuerzo estructural tal como se detalló de manera general en el apartado 6.5.

Además, también se presenta una tabla en el *Anexo 12* con la caracterización de la estructura actual del tejado existente para que se tuviera en cuenta los elementos que desmontaron o se alteraron para el diseño y posterior construcción de la cubierta verde a partir del modelado y simulación de variables físicas. En el *Anexo 11* se mencionan componentes de la cubierta verde, descripción de la composición, espesores, imágenes y conductividades térmicas de los mismos.

Por otra parte, con base en los costos estimados en la *tabla 1* y *2* del presente documento en el capítulo 6.6 de metodología se obtiene un precio por m² de \$ 476.168 y \$ 355.997 respectivamente, lo cual se encuentra muy por encima del precio promedio de una cubierta verde que es de aproximadamente \$ 225.000 (Albarracín, 2016), sin embargo es de resaltar que las condiciones de implementación de la cubierta están fuera de lo categorizado para determinar ese precio promedio; una de esas es la inclinación del techo de 23° lo cual genera ventaja en el momento de escoger el sistema de impermeabilización, pero por otro lado se diseño

completamente un sistema contra el deslizamiento y al mismo tiempo para el mantenimiento lo que llevó a incurrir en un costo de \$5'603.900 tanto para el escenario con impermeabilización de manto asfáltico (opción más viable) como para el de Sika (opción menos favorable).

El modelo de optimización financiera explicado en sección de 6.6, en el cual se obtuvo para el caso del flujo de fondos realizado con la impermeabilización de Sika, un valor de 6.21% de tasa interna de retorno, tanto por el método de tanteos como por el de Newton-Raphson, y en el escenario propuesto en la *tabla 4* se halló una rentabilidad del proyecto del 10.64% de la TIR (por ambos métodos) como se explicó en la sección antes mencionada con la finalidad de validar la veracidad de este resultado.

En la alternativa con los componentes de la empresa Sika (*tabla 1*), el cual se obtuvo un valor de 6.21% de la TIR, es decir, aproximadamente 5 puntos porcentuales por debajo de la cubierta verde aplicada con manto impermeabilizante. No obstante, en la industria se hallaron materiales de alta calidad para casos detallados de cubiertas verdes, por ejemplo, Centimp es una empresa local con sucursal en Medellín la cual realizó una visita el 3 de mayo del 2021 en la unidad residencial con el objetivo de ofrecer una cotización sobre los materiales a implementar como: sistema de geomembrana PVC anti-raíz, manto asfáltico poliéster anti-raíz, sistema de poliuretano con lámina de protección anti-raíz, lámina drenante polietileno y geotextil sufridor filtrante, donde el valor por metro cuadrado de \$120.900.

Contrastando con la alternativa de la empresa Sika donde se usaba geotextil 1800 para filtración, lámina drenaje 32T, Sarnafil G-476 adherida con dos componentes obteniendo un precio por metro cuadrado de \$110.455 y por el último el escenario real con manto asfáltico 3.5mm, lámina drenante proveída por la empresa Centimp junto a la capa impermeabilizante con mano de obra local en ayuda de los autores se generó un costo por m² de \$82.017,8 por lo

que esta opción generó una rentabilidad superior a lo largo de la proyección de la vida útil de la cubierta verde.

Es de resaltar que las condiciones de la estructura como la pendiente, el refuerzo estructural realizado a falta de una viga cinta en la vivienda y una viga canal en uno de los extremos de la habitación generó sobrecostos en el proyecto por más de \$5'000.000 para el caso de cualquiera de las dos alternativas y por consecuente el retorno sobre la inversión a lo largo de la vida útil del proyecto resulta poco atractivo para el escenario desarrollado en el proyecto en cuestión.

Al compararse este retorno de la inversión (10.64% durante 20 años) con el mejor CDT del mercado el cual es de 7,43% anual (Confecop, 2019) lo que se traduce en más del 100% durante los mismos 20 años de vida útil esperada de la cubierta, sin embargo es de resaltar que el objeto de los proyectos sostenibles consideran beneficios ambientales sobre los económicos en el momento de la evaluación económica, no obstante se consideró esta sección dada la magnitud del proyecto, la inversión y futuras ideas de negocio asociadas al desarrollo de construcción sostenible.

Durante el desarrollo del modelo de optimización lineal, se encontró una sola empresa a nivel local que pudiese proveer uno de los elementos de la cubierta verde, mientras que a nivel nacional existen diversas organizaciones, especialmente en ciudades principales (Bogotá y Medellín) que brindan el acompañamiento en todo el proceso de instalación, pero debido a los altos costos ofertados de estas se optó por construir la cubierta verde con ayuda de mano de obra no calificada. Esto plantea la poca oferta de proyectos de cubiertas verdes en la ciudad de Bucaramanga por lo que un estudio detallado a este nicho de mercado sería de vital importancia para pensar en una futura idea negocio para el segmento de la construcción sostenible.

A su vez, se logró encontrar que el nicho cuenta con poca oferta de organizaciones de este tipo a nivel local dado el alto costo y la baja conciencia de las personas acerca del tema. Esto

se vio evidenciado en el caso de estudio, donde múltiples residentes rechazaron la idea de inmediato priorizando la fachada a los beneficios que una cubierta verde aporta.

Aun así, se destaca que el haber construido la cubierta verde extensiva propicia diferentes beneficios no cuantificables pero que son amigables con el medio ambiente como lo son regulación de la temperatura, aislación térmica y acústica del área de implementación, prolongación de la vida útil de la cubierta existente, regulación de la humedad y el efecto isla de calor, entre otros (García, 2010).

Ahora bien, los datos obtenidos y tabulados con la ayuda de la estación meteorológica del ICP ubicado en Piedecuesta para la temperatura ambiente; los termómetros Elitech y el sistema de medición Arduino tanto para las temperaturas sobre la superficie de la teja en el techo de la habitación al igual que en el interior de esta son presentados desde el *Anexo 19* en donde se graficaron los datos de las mediciones de temperatura ambiente por la estación meteorológica del ICP hasta el *Anexo 21* en donde se muestran los registros de las mediciones en el interior de la habitación en el mes de marzo de 2020.

En los datos obtenidos, se puede concluir las temperaturas máximas y mínimas presentadas a modo de resumen en la siguiente tabla para una mejor interpretación durante los meses de febrero, marzo y abril del año 2020 medidos tanto por la estación del ICP como por los termómetros instalados en el techo y cuarto de la habitación objeto de estudio. Sin embargo, para una visualización gráfica completa de los periodos analizados se recomienda dirigirse a los anexos mencionados anteriormente.

A continuación, la tabla resumen con las temperaturas críticas:

| FEBRERO | | | |
|---|---------------------------------------|-------------------------------------|--|
| Modo obtención datos/Rangos temperatura | Estación meteorológica ICP (ambiente) | Termómetro Elitech a 5cm de la Teja | Termómetro Elitech (Interior habitación) |
| T°C máxima | 31,9 | 42,7 | 36,0 |
| Fecha | 19/02/2020 | 22/02/2020 | 19/02/2020 |
| Hora | 1:00 p. m. | 12:58 p. m. | 14:01:40 p. m. |
| T°C mínima | 18,8 | 17,9 | 22,4 |
| Fecha | 6/02/2020 | 7/02/2020 | 7/02/2020 |
| Hora | 6:00 a. m. | 5:58 a. m. | 7:01 a. m. |
| MARZO | | | |
| Modo obtención datos/Rangos temperatura | Estación meteorológica ICP (ambiente) | Termómetro Elitech a 5cm de la Teja | Termómetro Elitech (Interior habitación) |
| T°C máxima | 31,9 | 48,6 | 34,5 |
| Fecha | 5/03/2020 | 5/03/2020 | 9/03/2020 |
| Hora | 12:00 p. m. | 11:08 a. m. | 12:01 a. m. |
| T°C mínima | 18,0 | 16,4 | 22,9 |
| Fecha | 22/03/2020 | 22/03/2020 | 22/03/2020 |
| Hora | 5:00 a. m. | 5:08 a. m. | 6:01 a. m. |
| ABRIL | | | |
| Modo obtención datos/Rangos temperatura | Estación meteorológica ICP (ambiente) | Termómetro Elitech a 5cm de la Teja | Termómetro Elitech (Interior habitación) |
| T°C máxima | 29,10 | 49,00 | 34,70 |
| Fecha | 26/04/2020 | 2/04/2020 | 10/04/2020 |
| Hora | 2:00 p. m. | 10:08 a. m. | 11:01 a. m. |
| T°C mínima | 18,70 | 19,00 | 22,40 |
| Fecha | 22/04/2020 | 3/04/2020 | 20/04/2020 |
| Hora | 3:00 a. m. | 5:08 a. m. | 5:01 a. m. |

Tabla 14 - Temperaturas críticas (máximas y mínimas) estación ICP, cubierta habitación e interior de esta.

Fuente: Propia

Tal como se puede apreciar en la **tabla 14**, las temperaturas críticas para cualquiera de los 3 escenarios corresponden a las medidas sobre la teja de la cubierta de la habitación y esto se debe a que este elemento al estar expuesto a las fluctuaciones diarias y también estar instalado directamente sobre la teja, produce que se generara mayor afectación y transmisión de flujo de calor al interior y exterior de la habitación y a su vez también es de tener en cuenta que dentro de los materiales analizados cuenta con el mayor valor de conductividad térmica ($0,824 \text{ W/m}^*\text{K}$) lo que genera una mayor capacidad de transmitir energía térmica a lo largo de toda la superficie.

Por tanto, la medición de la temperatura sobre la teja en cualquier escenario será mayor o menor que la del cuarto debido a que este se encuentra aislado de la exposición directa de la radiación solar y a la vez que la del ambiente. Adicional, la inercia térmica del sistema de este elemento genera que almacene y libere energía de una manera más rápido obteniendo así una adaptación mayor a las temperaturas ambientes en comparación de lo que ocurre en el interior de la habitación.

De acuerdo con los modelos analizados en la sección 6.3.2, se escogió el modelo de Tabares-Velasco & Srebric (2011) y (Konkov, 2018) para implementarlos y observar con base en los datos obtenidos y por medio de un ajuste de datos, conocer cuál de ellos es el más adecuado al caso de estudio tratado en cuestión con el fin de encontrar los valores más representativos a la realidad.

Con base en estos se representa un fragmento de la gráfica mostrada en la **ilustración 54** donde esta muestra los resultados producto de la simulación de variables y procesos asociados a la transferencia de calor en cada modelo (Tabares & Srebric y Konkov) con el fin que observar su comportamiento en relación con la temperatura ambiente (T_a) y la temperatura del sustrato (T_g) simulada de acuerdo a los diferenciales evidenciados en Tabares Velasco (2009).

Del mismo modo, los valores de temperatura del follaje fueron modelados con base en los resultados experimentales del autor referido.

La gráfica mostrada a continuación, corresponde a datos obtenidos por la estación meteorológica de Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Pontificia Bolivariana sede Bucaramanga, complementando con los datos de la estación del ICP Piedecuesta comprendidos entre el mes de junio y julio del año 2019 como se representa en la siguiente ilustración (54). Aunque previamente se evidenciaron datos meteorológicos (T_a) para el 2020, es de resaltar que, en dicho año, la Seccional Bucaramanga de la UPB no pudo brindar los registros de las tres estaciones ubicadas en el interior del campus a causa de las restricciones impartidas por el Gobierno Local debido al virus Covid – 19.

Esto implicó que para la simulación de los modelos de Tabares & Srebric y Konkov, se tomaran datos del año 2019 comprendidos entre el 8 de junio y el 8 de julio, teniendo en cuenta que la siguiente ilustración únicamente permite visualizar 238 datos simulados. Esta modelación fue realizada con el fin de escoger el modelo más idóneo para la aplicación en el proyecto en cuestión como se puede visualizar a continuación:

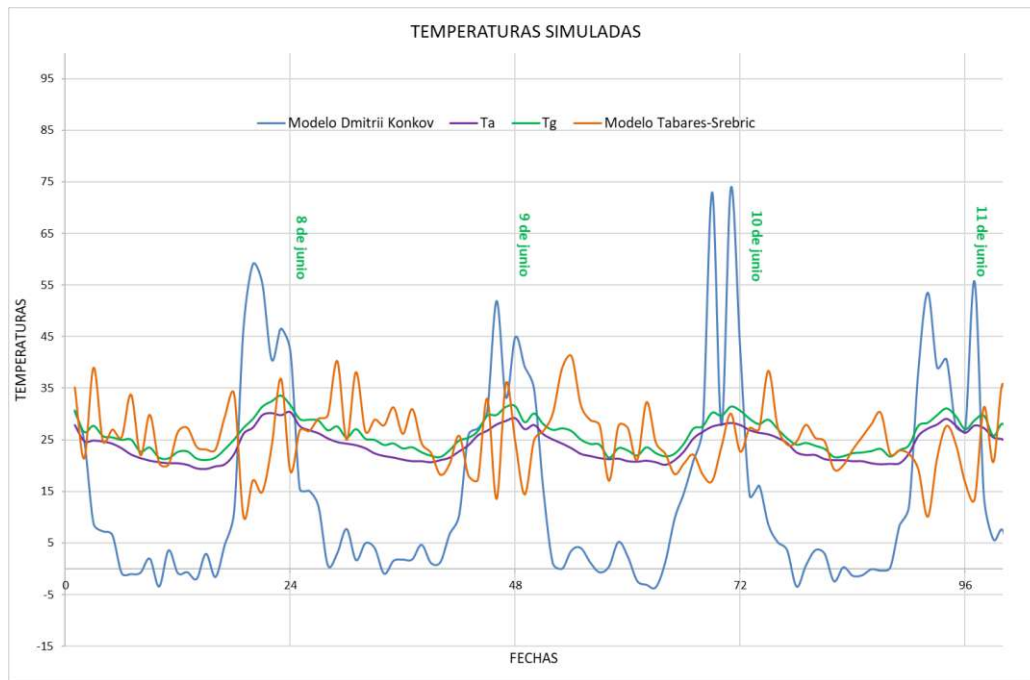


Ilustración 54 - Temperaturas simuladas vs temperaturas ambientes registradas

Fuente: Propia

En la ilustración anterior se puede apreciar que con los datos simulados con base en Tabares-Velasco & Srebric (2011) se generan las menores discrepancias entre estos en conjunto con las temperaturas del suelo y del ambiente. También se aclara que en el presente proyecto se optó por trabajar con el modelo de dicho autor pues las corridas de la simulación presentan, inicialmente, visualización de valores más fiables que la aplicación del modelo de Konkov.

Sin embargo es de tener en cuenta que tanto la adaptación de todos los modelos analizados requieren de ajustes con la finalidad de obtener una simulación de la temperatura que sea acorde con los registros del equipo de medición ubicado en la vivienda, pero como se mencionó anteriormente, el alcance de esta investigación buscó el análisis de diferentes modelos de transferencia de calor y la formulación o adaptación del más adecuado teniendo en cuenta las condiciones ambientales expuestas de la cubierta verde más no la validación de los mismos.

Esta simulación de ambos modelos se realizó con el fin de interpretar cuál de estos se adaptaría a una distribución normal de probabilidad para la selección del mismo, donde, en el caso de la formulación realizada por Konkov (2018) la cual data originalmente del modelo FASST, se obtuvo el siguiente histograma de frecuencia, con los 714 datos equivalentes a un mes completo por medio del lenguaje de R:

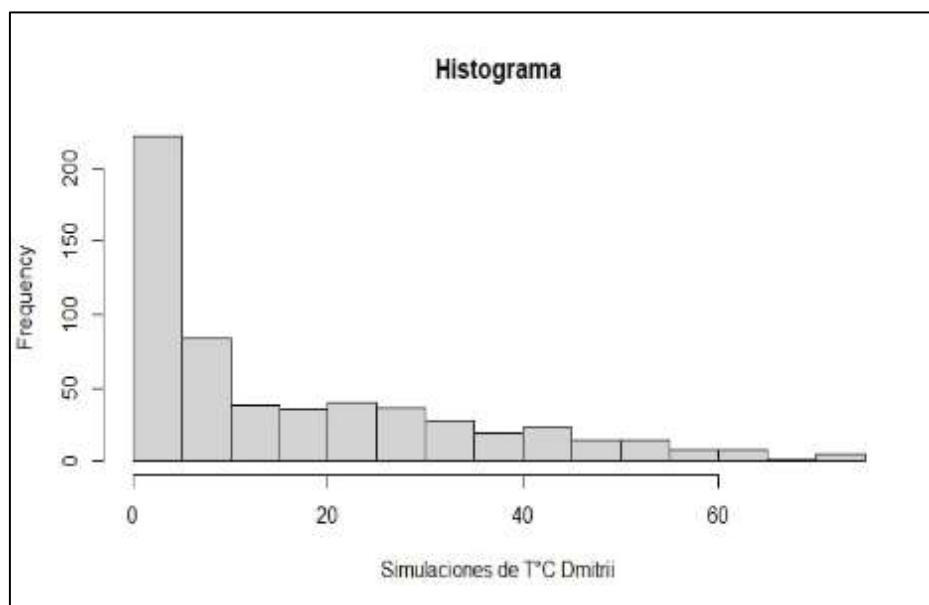


Ilustración 55 - Histograma de frecuencias con el modelo realizado por Dmitrii Konkov

Fuente: Autores

En este, claramente se observa a simple vista que los datos no están normalmente distribuidos por lo que se procedió a aplicar un ajuste por medio de la herramienta de R-Studio con la función Log-Normal el cual es derivada de la distribución Normal y que la curva se asimila un poco a los datos del histograma antes mostrado.

Una vez realizado el ajuste en R-Studio y graficando los parámetros tal como la curva de densidad de los datos, el gráfico de cuantil-cuantil, la función de distribución acumulada CDF y el P-P plot, se obtienen los siguientes esquemas:

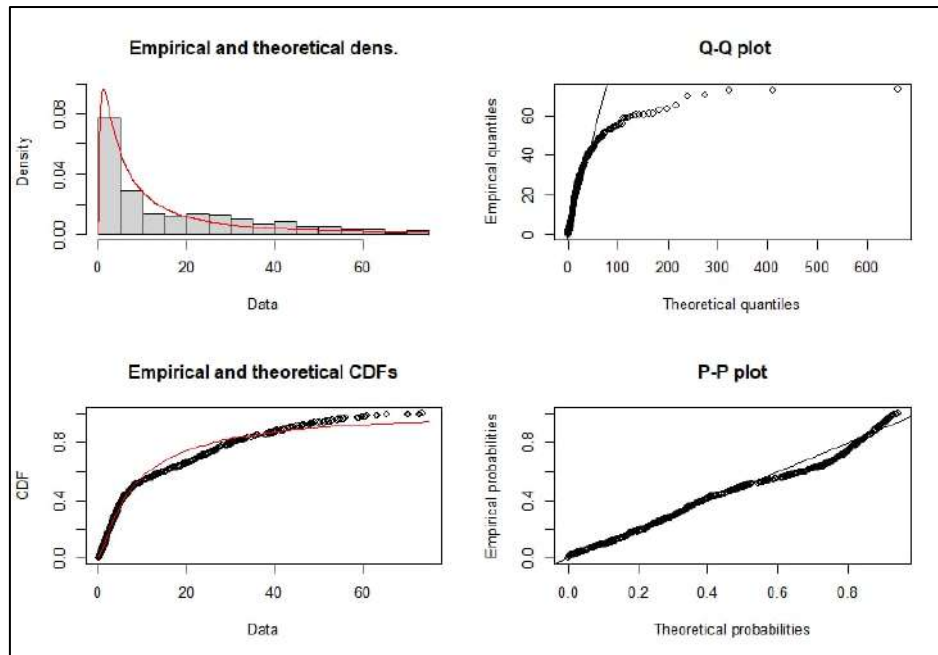


Ilustración 56 - Parámetros histograma con el modelo de Konkov

Fuente: Autores

Después de observar un cumplimiento de los parámetros a excepción de la gráfica de cuantil-cuantil, se procedió a realizar la prueba de Kommorov Smirnov y la de Chi Cuadrado el cual ambas son definidos como procedimientos estadísticos para reflejar la concordancia con una distribución definida, en este caso la LogNormal. Adicional, se calculó el Logaritmo de todos los datos junto con el histograma de la alteración de estos donde si se obtenía una distribución normal quería decir que cumplía con acomodarse a la LogNormal, pero no se obtuvo esto, por tanto, quiere decir que no se ajustan a dicha distribución tal como se aprecia en las siguientes imágenes:

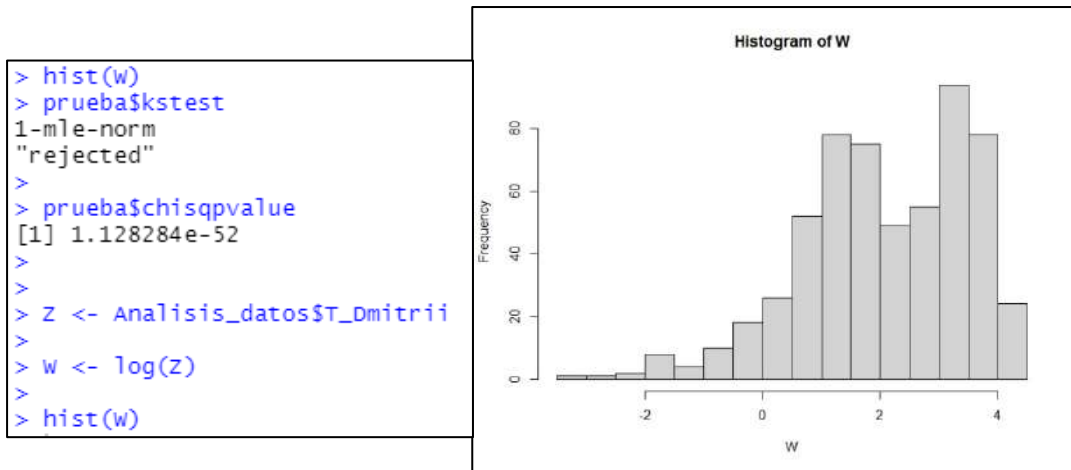


Ilustración 57 – Histograma del logaritmo de cada uno de los datos para observar su ajuste

Fuente: Autores

Con esto se aprecia que los datos simulados por medio del modelo de transferencia de calor de Dmitrii no se ajustan a una distribución LogNormal, pues a pesar de que se observará previamente en la **Ilustración 55**, aun así es de resaltar que estos datos no comparten ningún patrón y luego de haber realizados las pruebas de Kommorov Smirnov y la de Chi Cuadrado junto con el Logaritmo en base de 10 de los datos con el respectivo histograma de estos, se obtuvo que de ninguna manera el ajuste proyectado cumple con los datos de la simulación obtenida. También se pudo apreciar que el resultado de la prueba de Chi Cuadrado es 1.1282×10^{-52} lo que cual es un valor demasiado pequeño y esto refleja también el rechazo del ajuste de datos a la LogNormal.

En el escenario de las simulaciones con el código de Tabares, no se obtuvo ningún dato negativo, por lo que el histograma que representa las frecuencias de las temperaturas tiende a ajustarse, a simple vista, a una distribución normal tal como se aprecia en la siguiente figura:

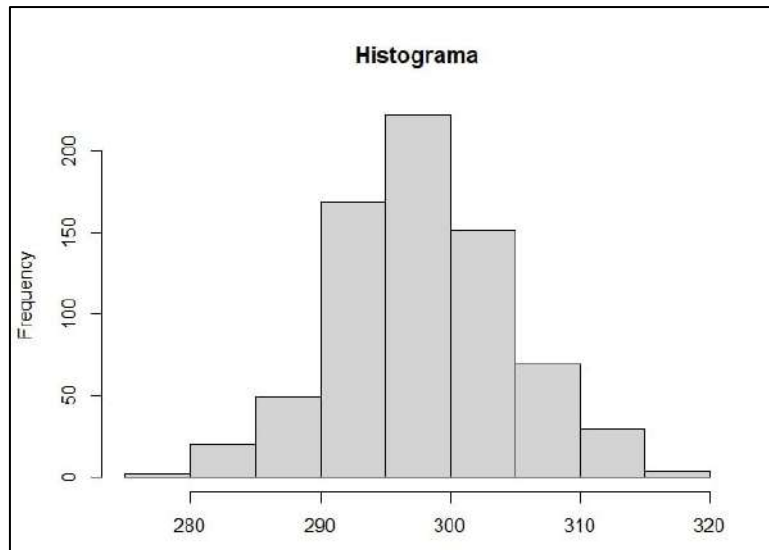


Ilustración 58 - Histograma datos con el modelo de Tabares & Srebric

Fuente: Autores

Debido a que la distribución de los datos tenía forma de “campana” se realizó ajuste de estos a la distribución normal y a su vez se graficaron los parámetros en R Studio como lo son la curva de densidad de los datos, el gráfico de cuantil-cuantil, la función de distribución acumulada CDF y el P-P plot, obteniendo lo siguiente:

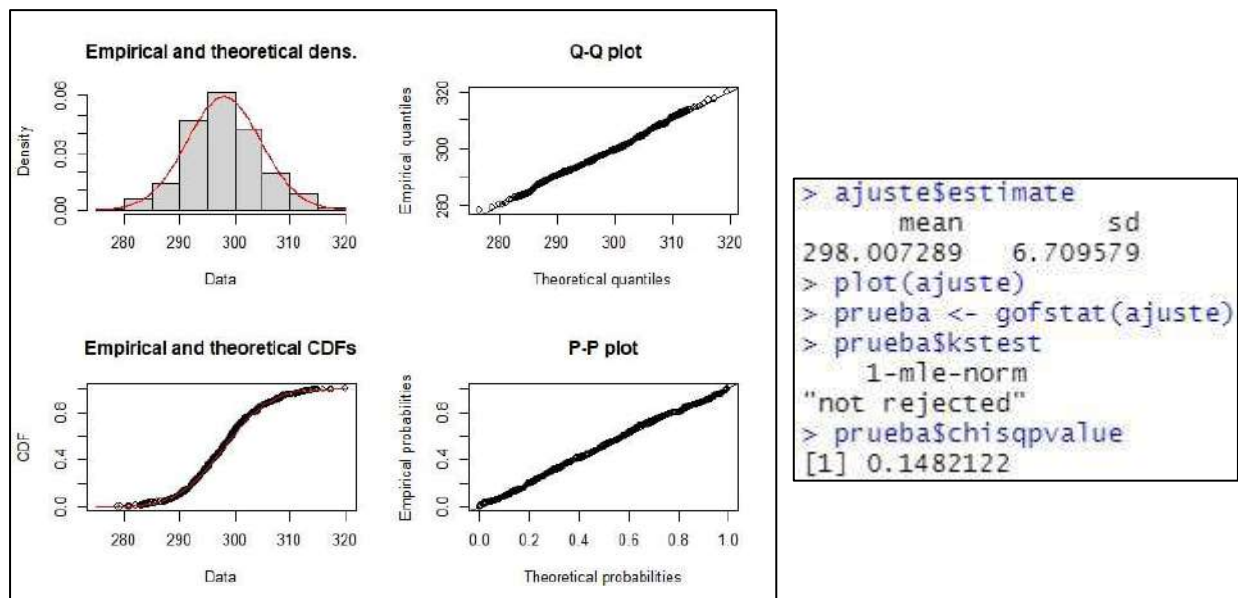


Ilustración 59 - Parámetros de ajuste a la distribución normal con la formulación matemática

Fuente: Autores

Con la visualización de los parámetros ajustados a una distribución normal se obtuvo una media de 25.594 y una desviación estándar de 5.609 en el lenguaje de R, y también se aprecia el ajuste de los datos obtenidos de la simulación a la función de densidad, el gráfico de cuantil-cuantil, el CDF y el P-P plot, por lo que para contrastar si realmente los datos productos del modelo de Tabares corresponderían a una distribución normal se aplicaron también las pruebas de Kommorov Smirnov y la de Chi Cuadrado obteniendo que para el caso del KS Test no fue rechazada y en el valor del χ^2 fue de 0.0013724, lo cual es más grande que en el caso del ajuste de los datos de Dmitrii Konkov. Por tanto, se concluye que los datos producto de la simulación del modelo de Tabares será tomada en cuenta para comparar los escenarios de mediciones con y sin cubierta verde mientras que los de Dmitrii Konkov no se usarán debido a la poca confiabilidad que generan los mismos.

Seguidamente, en cuanto a la implementación de ambos modelos; los datos de entrada o los input de las variables principales como la temperatura ambiente (T_a), Radiación Solar (I_s), Velocidad del Viento (W_{real}), Precipitación (Mg_{medido}), Presión atmosférica (P_{atm}) fueron adquiridos gracias al Instituto Colombiano del Petróleo (ICP). Con respecto a entradas restantes del modelo, se hizo uso de valores teóricos estándar identificados principalmente en Frankenstein & Koenig (2004b) para el modelo de Konkov y Tabares (2009) para el de Tabares & Srebric. Para ambos, se extrajeron valores de variables de Cengel (2012) para valores o propiedades termodinámicas y Kreith (1970) explícitamente para el valor del coeficiente de transferencia de calor por convección para el análisis del último término (estructuras compuestas) donde, se consideró régimen de convección natural.

Durante la implementación de los dos modelos de transferencia de calor, se encontró que, para el FASST, se omitió los flujos de calor asociados al movimiento de agua, pues se encontró a través de corridas del modelo, inconsistencias dimensionales en el último término del balance del sustrato y valores para el flujo de calor por precipitación extremadamente altos.

Sin embargo, los balances de follaje y sustrato en general, están compuestos por los tipos principales de transferencia de calor postulados por Kreith (1970), por lo que se optó por aplicar el modelo omitiendo los efectos generados por el movimiento de agua en el balance de energía y masa.

Es necesario recalcar que este proceso de movimiento de agua, al igual como lo desarrolla Frankenstein & Koenig (2004b) presentado en el dosel de la cubierta verde es de suma importancia en la transferencia de calor, no obstante, por ser un desarrollo de tesis de pregrado, no se consideró, debido al amplio requerimiento del tema y por esto se dejará para futuras investigaciones donde se puede analizar más a fondo el movimiento de agua y así llegar a generar mayores cercanías entre las simulaciones obtenidas con el código de Konkov (2018).

En la aplicación de ambos modelos se usaron valores teóricos estándar, uno de estos datos corresponde al valor de Cobertura Fraccional del follaje (S_f) el cual Dickinson et al. (1986) define como un máximo de 0.85 para tipos de vegetación similares al del presente caso de estudio. Dicho valor, se halla en el rango de valores experimentales obtenidos por Konkov (2018) los cuales oscilan entre 0.5060 hasta 0.9722 para un periodo de 13 meses.

Sin embargo, respecto al valor del Índice de Área foliar (LAI), el cual es un parámetro de visualización de las hojas de las plantas del techo vegetal, se realizó con base en Konkov (2018) el cual propone realizar un coteo de aproximadamente 100 hojas de plantas de manera directa sobre la cubierta y en esas mismas medir cuál es el área aproximada donde se hallan. Una vez se tiene este valor del área que para el caso del presente proyecto es de $15.12 \times 41.16 \text{ cm}$, pero en este caso se determinaron 115 brotes en total al bajar los tallos de la cubierta. Luego de esto, se realizó un esparcimiento de todas las hojas a través de un cuadrado de dimensiones conocidas ($5 \times 5 \text{ cm}$) y de esta manera conocer la proporción de área verde respecto del papel con el software de diseño asistido AutoCAD el cual dio como resultado 0.6 o 60% del total como se aprecia en las siguientes imágenes:



Ilustración 60 - Cuadrado de 5x5cm con 115 brotes

Fuente: Autores

Una vez definida el área con los 100 brotes e insertados en el software AutoCAD, se obtuvo la proporción de área verde mostrada anteriormente como se muestra a continuación:



Ilustración 61 - Estimación de la proporción de área verde para 115 brotes

Fuente: Autores

Una vez recopilados todos los datos necesarios, la fórmula para el cálculo de este parámetro de visualización sería el siguiente:

$$LAI = \frac{0.6 * 2500mm^2 * 115}{6223mm^2} = 2.77$$

Con respecto a la selección del modelo de Tabares & Srebric (2011) como el más idóneo para el caso de estudio, este se aplicó con valores de entrada obtenidos gracias a la estación meteorológica del ICP nuevamente a finales del mes de junio del 2021. En esta aplicación del modelo, las temperaturas del follaje y del sustrato (T_f y T_g) fueron medidas de manera experimental con equipos de medición compatibles con la plataforma Arduino.

Junto a estas, se mide el valor del contenido volumétrico de agua (VWC) por medio de sensores de humedad programados en conjunto en el sistema de medición en la misma plataforma, dada la importancia de esta variable para determinar el coeficiente de conductividad del medio de crecimiento. Aunque Vera et al. (2017), propone un valor para la misma configuración del sustrato empleado en la sección analizada, se optó por manejar la relación propuesta y mejorada por Tabares & Srebric (2011) la cual depende estrictamente de la variación del VWC.

Cabe aclarar que para el modelo empleado, se tuvo en cuenta, como se especificó en el diseño metodológico en la sección 6.3 para el cálculo del flujo de calor por convección para el modelo propuesto por Tabares-Velasco & Srebric (2011), dos métodos para el cálculo del calor sensible. Dichos métodos, se basaron en los escenarios planteados ($S_f=1$, $S_f=0$) los cuales consisten para el escenario que considera $S_f=1$ el análisis del flujo de calor sensible de acuerdo a los números de Péclet, Nusselt y las propiedades termodinámicas asociadas a un problema de capa límite para la solución de una transferencia de calor (Bejan, 2013).

Entre tanto, para el escenario donde $S_f=0$, se consideraron los planteamientos de la ecuación de Deardoff planteada por Ayata et al. (2011) junto a los ajustes de Konkov (2018) quien se basó principalmente en Frankenstein & Koenig (2004b). Esto debido a que ambos planteamientos de la ecuación fueron validados y son aptos para el presente caso de estudio.

Por lo tanto, a continuación, se evidencia una sección de los resultados de la simulación final de la cubierta verde extensiva construida en un techo inclinado en una unidad de vivienda con ambiente húmedo tropical ubicada en cercanías a la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga.

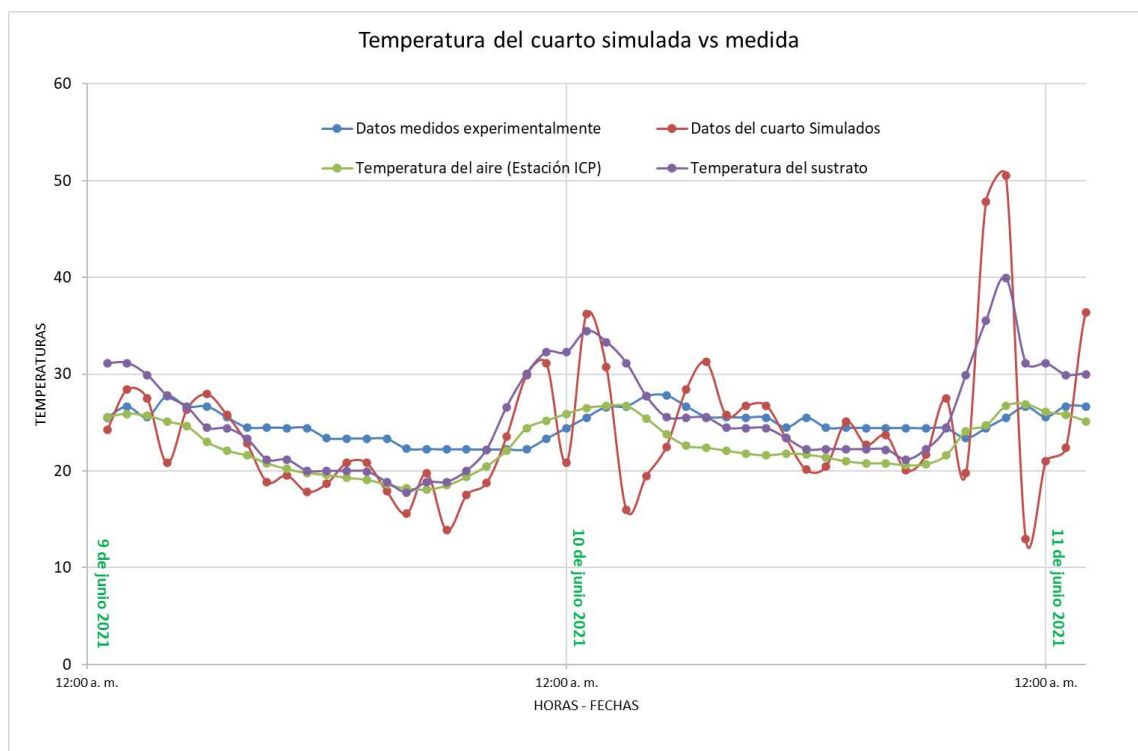


Ilustración 62 - Resultados simulación temperatura de la habitación

Fuente: Autores

Para visualizar el total de los datos simulados, dirigirse al **Anexo 22** en esta misma sección. No obstante, en la ilustración anterior se puede apreciar lo relacionado que se encuentra la temperatura en el interior de la habitación con la del sustrato y aunque se evidencia error en los datos obtenidos; una razón que se atribuye a esto corresponde a lo estipulado por Ayata et al. (2011) donde el diferencial de temperaturas posee una relación directa con el flujo de calor sensible y este al tener una relación inversa con el flujo de calor latente, afecta la estabilidad del sistema, por tanto los resultados obtenidos.

Avanzando en dicho análisis, se logró encontrar diferenciales de temperatura de hasta 13°C entre el sustrato y el aire, lo cual se considera un valor invalido que pudo haber sido generado a causa de una mala medición por parte del equipo de la termocupla instalada en la cubierta vegetal, pues tal como Tabares (2009) argumenta, los equipos de medición empleados en dicha investigación (termistores), se pueden ver afectados significativamente por la radiación entrante al sistema, lo cual afecta los datos experimentales.

De los resultados obtenidos, se puede observar como para temperaturas del ambiente de 24.55°C o superiores a esta, se generaron valores muy altos en las medición de las termocuplas instaladas en el sustrato, originando diferenciales de temperatura muy altos e ilógicos afectando directamente el cálculo de flujo de calor convectivo dada su relación directa como lo presenta Ayata et al. (2011). Esto se vio influenciado directamente en el balance asociado al primer escenario contemplado ($S_f=0$), por lo que se optó a criterio de los autores aceptar valores para dicho balance (el cual requiere de un arduo reforzamiento teórico) de más o menos 10°C del valor de la temperatura del sustrato y lo cual se ve evidenciado en el modelo empleado expuesto en el *Anexo 22*.

Sin embargo, estos escenarios específicos requieren de una investigación más detallada en relación al cálculo del calor convectivo considerando que existen diversos métodos para la solución del mismo como lo planteó Ayata et al. (2011) y como se tuvo en cuenta por parte de los autores.

Por otro lado, también se evidencia en la *ilustración 62* que las temperaturas del sustrato, así como las simuladas y medidas, son mayores que los registros de la temperatura ambiental. Esto, es ocasionado principalmente por el efecto de la inercia térmica el cual se ve influenciado por la radiación solar y a su vez por el valor del Índice de Área Foliar el cual corresponde 2.77 y se espera que aumente al menos al doble con el pasar de los meses generando que haya una disminución en las temperaturas como lo evidencia Kumar y Kaushik (2005), al encontrar

como las fluctuaciones de temperatura en la interfaz disminuyen de 11.6 a 3.6°C al aumentar el LAI de 0.5 a 3.5.

Del mismo modo, autores como Tabares (2009), Zhang et al. (1996), argumentan la gran influencia del LAI para lograr disminuir las temperaturas superficiales. Para el caso del parámetro de la cobertura fraccional del follaje se tiene un valor de 0.5739; el cual es muy bajo actualmente, lo que permite que la radiación solar incida en una mayor proporción en el sustrato al no contar con una cubierta vegetal completamente poblada la cual sirve como barrera para inhibir dicho fenómeno meteorológico.

Esto se puede evidenciar en la ecuación 34 la cual depende de dicha variable y a su vez esta fórmula brinda la suposición o la asunción teórica empleada en el modelo para el despeje y posterior cálculo de la temperatura interna de la habitación. Sin embargo, este valor se espera sea mayor a 0.85 en diciembre del presente año de acuerdo con los valores obtenidos a través del proceso de esparcimiento de las plantas en el caso de estudio, donde se logró aumentar el valor de Sf desde 0.15 a 0.63.

Aunado a esto, para determinar esta variable (Cobertura Fraccional del follaje Sf), se utilizó la herramienta AutoCAD para identificar las áreas correspondientes a los brotes de *Sedum* plantados en un lote dentro del conjunto residencial Calatrava.

Inicialmente, se tomaron fotografías al inicio del proceso (noviembre 2020) y se determinó el área para un cálculo inicial de la variable Sf. La *ilustración 63*, representa todos los brotes de *Sedum* plantados en un lote 6 meses antes de instalar la cubierta verde al igual que la *ilustración 64* solo que con las áreas sombreadas de cada parche de hoja.



Ilustración 63 - Áreas identificadas de brotes para el cálculo de la variable Cobertura Fraccional del Follaje (Sf) en noviembre del 2020

Fuente: Autores



Ilustración 64 - Áreas sombreadas de los brotes identificadas para el cálculo de la variable Cobertura Fraccional del Follaje (Sf) en noviembre del 2020

Fuente: Autores

El valor obtenido el 16 de noviembre del 2020 para la Cobertura Fraccional del Follaje (Sf), corresponde a 0.15; esto se debe a que el prototipo correspondiente a un agua (16.375 m²) fue llenado dejando espacios vacíos bastante significativos, con el objetivo de poder determinar a la hora de trasladar las plantas al techo, el cambio de esta variable.

Durante este periodo, el valor de la Cobertura Fraccional se vio afectado por la plaga conocida “pulgón”, el cual, luego de consultar a viveros locales y expertos en el tema, quienes recomendaron el no uso de fertilizantes o remedios químicos, sino optar por los naturales como el uso de vinagre, tabaco o ajo combinado con agua y otros elementos, se eliminó por empleando el producto Aqua Clean ACF-SR Plus, el cual corresponde a un remedio biológico para el suelo que estimula la actividad microbiana en el sustrato, la incorporación de nutrientes y duración de estos.

Para el 7 de mayo de 2021; una semana antes de llevar todas las plantas desde el lote hasta la cubierta, se logró obtener una cobertura vegetal de 0.63 como se representa en las Ilustraciones 65 y 66, lo que demuestra cambios esperados para esta variable como lo representa Konkov (2018); quien, durante su periodo experimental de aproximadamente 13 meses, obtuvo variación de esta variable de 0.5 a 0.9.



Ilustración 65 - Áreas identificadas de brotes para el cálculo de la variable Cobertura Fraccional del Follaje (Sf) en mayo del 2021

Fuente: Autores



Ilustración 66 - Áreas sombreadas de los brotes identificados para el cálculo de la variable Cobertura Fraccional del Follaje (Sf) en mayo del 2021

Fuente: Autores

Para el caso de estudio y el modelo de transferencia de calor, se tiene en cuenta el valor calculado para la vegetación en el techo (Ilustración 67 y 68) la cual se espera, según lo evidenciado, logre aumentar para final del presente año a valores cercanos a 0.85.

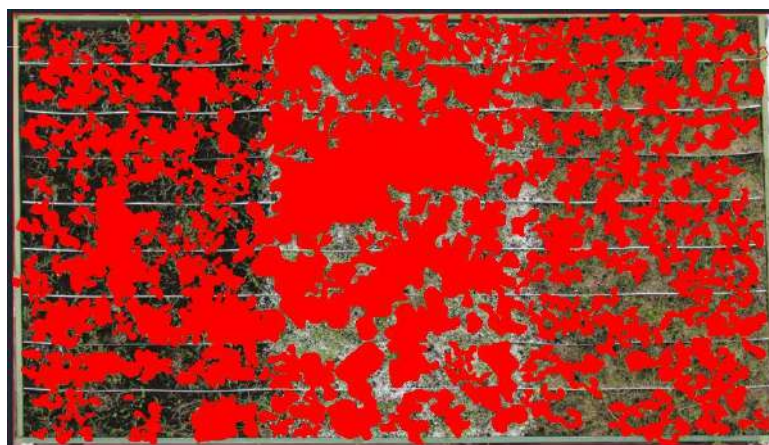


Ilustración 67 - Áreas sombreadas de los brotes identificados para el cálculo de la variable usada (real) de Cobertura Fraccional del Follaje (Sf) en junio del 2021 en la unidad de vivienda con Maní Forrajero

Fuente: Autores



Ilustración 68 - Áreas sombreadas de los brotes identificados para el cálculo de la variable usada (real) de Cobertura Fraccional del Follaje (Sf) en junio del 2021 en la unidad de vivienda con soleirola soleirolii

Fuente: Autores

Las ilustraciones 67 y 68 mostraron una vista superior la cubierta verde en funcionamiento donde, con la ayuda de un Dron, se realizaron las tomas aéreas de la estructura verde con las cuales se desarrolló el cálculo de la Cobertura Fraccional del follaje (Sf). Para el cálculo de esta variable, se realizaron tres procedimientos, el primero de ellos comprendió la determinación de la variable antes mencionada en la especie autóctona "maní forrajero" obteniendo una proporción del 48.48% (0.4848) a tan solo un mes de haber construido la cubierta; para el segundo escenario con la especie *Sedum* "soleirolia soleirolii" se concluyó que esta contiene una cobertura de la fracción vegetada mayor que para el caso de la especie antes nombrada con 66.30% (0.6630).

Por último, el tercer y a su vez el escenario generado, se toma en consideración una única área de la cubierta verde de 32.75m² (16.37m² para el maní y al igual que para el *Sedum*) donde en total el cálculo de la variable de interés dio como resultado 57.39% (0.5739), cómo se puede visualizar a continuación, pero se espera aumente como se evidenció en los últimos 6 meses de la investigación.

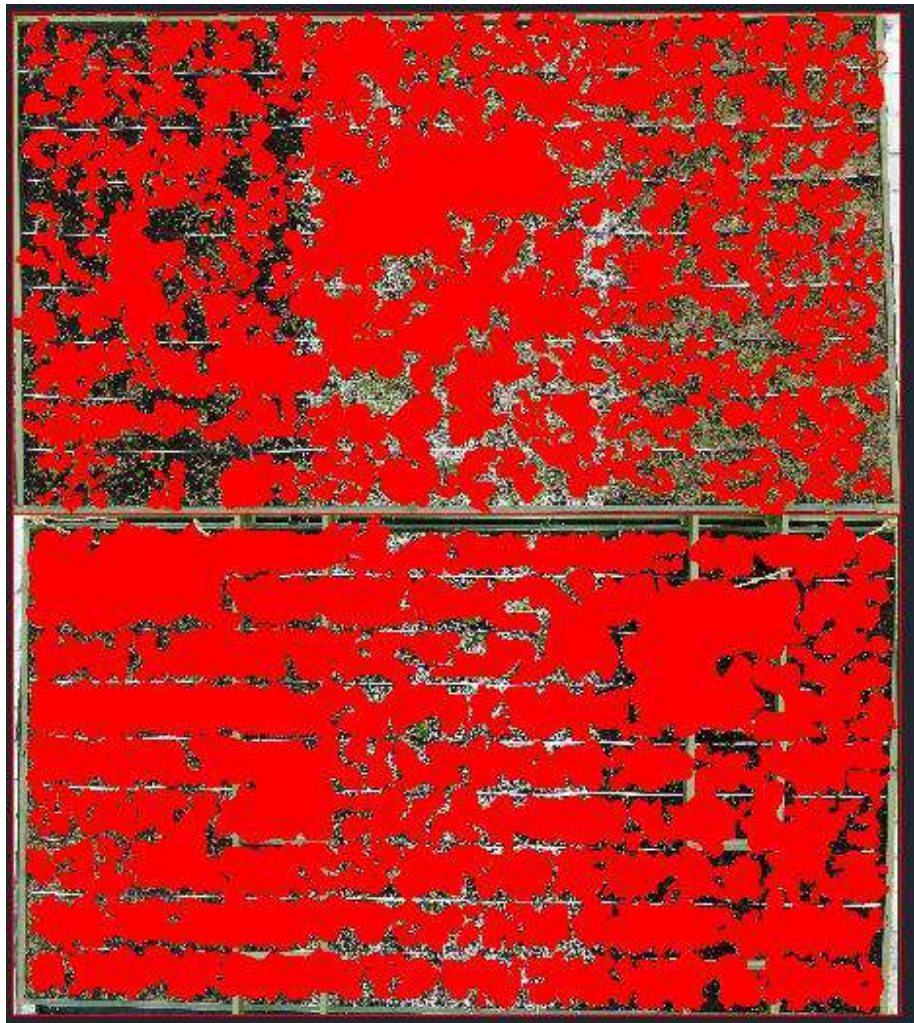


Ilustración 69 - Áreas sombreadas de los brotes identificados para el cálculo de la variable usada (real) de Cobertura Fraccional del Follaje (Sf) en junio del 2021 en toda la cubierta de la unidad de vivienda

Fuente: Autores

Con base en el seguimiento realizado a las especies de plantas de Sedum (*Soleirolia soleirolii*), se demostró a lo largo del periodo de prueba (6 meses), en el cual se vio sometida a

condiciones extremas con frecuencia de riego de una a dos veces por semana junto al mantenimiento respectivo; que se pudo generar así un incremento de la Cobertura Fraccional del follaje de 0.48 el cual que afirma a los autores la capacidad de sobrevivir en el tiempo de funcionamiento de la cubierta y a su vez se plantea un posible crecimiento para el mes de diciembre de esta variable a valores de 0.85 o más los cuales corresponden a valores ideales para el manejo de esta.

Cabe aclarar que las plantas Sedum seleccionadas presentaron problemas con plagas como el pulgón, por razones que no fueron posibles esclarecer, y para ello, consultando con diferentes almacenes de fertilizantes e insumos para combatir dicha plaga al igual que expertos en el tema, se optó por emplear el producto Aqua Clean ACF-SR Plus; producto que se encuentra en las listas OMRI donde solo pueden participar aquellos que sean procesados o producidos orgánicamente.

Continuando con el análisis de los resultados obtenidos por medio de la simulación y teniendo en cuenta que dentro de los objetivos no se comprendía una validación, sino la adaptación e implementación de un modelo de transferencia de calor, se plantea para próximos estudios el validar los datos obtenidos en la formulación, con el fin de obtener un modelo de transferencia de calor completamente validado para el caso de estudio y tipos de proyectos similares para un ambiente húmedo tropical, con el fin de una futura propuesta de proyecto de negocio contemplado que el desarrollo de la industria en la actualidad está direccionada a la construcción sostenible.

Sin embargo, los datos arrojados por la simulación poseen un comportamiento acorde a lo esperado, a diferencia de ciertos valores atípicos los cuales son descartados a través de la regla de la distribución empírica el cual es aplicable únicamente para una serie de datos que se ajuste a una distribución normal tal como se presentó en el histograma de la ilustración 59 y entre más se ajusten a esta curva en forma de campana, mayor precisión tendrá dicha regla

(Menenhall et al., 2006). En los resultados obtenidos se escogió una regla equivalente al 68% donde se establece que el intervalo está definido por $(\mu \pm \sigma)$.

En el proyecto en cuestión, los resultados para establecer el intervalo antes mencionado corresponden a una media (μ) de 24.423 y una desviación estándar (σ) de 9.95. Con esto, se genera el intervalo $(24.423^{\circ}\text{c} \pm 9.95^{\circ}\text{c})$, donde de acuerdo con el escenario producto de la formulación obtenido y mostrado parcialmente en la ilustración 62, se genera un rechazo del 20.72% del total de datos en contraste con una aceptación del 79.28% de los mismos, es decir, que el rango de valores típicos realmente está comprendido únicamente entre $(14.47^{\circ}\text{c} - 34.38^{\circ}\text{c})$.

Sumado a esto, se realizó el cálculo del error del cuadrático medio (RMSE por sus siglas en inglés) tal como se describió en la sección 6.3.4 de metodología, donde se obtuvo como resultado RMSE promedio de 9.54°C entre las temperaturas de la habitación simuladas y medidas experimentalmente, lo cual representa una magnitud relativa del error.

El cálculo de este tipo de error es un buen método para comparar correlaciones entre sí y es empleado en diversos estudios, como lo argumenta Ayata et al. (2011). Sumado a esto, para el caso de estudio, el valor determinado es aceptable, pero los autores no lo consideran representativo o completamente válido, pues será necesario ajustar el modelo junto a los equipos de medición u optar por instrumentos con mayor precisión con el objetivo de lograr validar el modelo propuesto y de esta manera calcular un valor del RMSE real y más representativo.

Como último análisis, y considerado el más fundamental para el análisis de los datos obtenidos, se tuvo en cuenta las temperaturas medias experimentales o registradas por el 281 sistema de medición compatible con la plataforma Arduino, donde le logró identificar, una temperatura media en el interior de habitación de 24.74°C en el mes de Junio (con cubierta en

funcionamiento) para una temperatura ambiente media en ese mismo periodo de 23.3°C obtenida con ayuda de la estación meteorológica ICP y UPB remota.

Estos datos, se contrastaron con una temperatura media ambiental similar en el conjunto de datos con el cual contaban los autores (Anexos 19, 20 y 21). Esta corresponde al mes de abril con un valor promedio de 23.34°C, la cual reflejó en la habitación una temperatura media de 27.33°C.

Con esta información, se comparan dichos meses por medio de los diferenciales de temperatura calculados con los valores promedio, los cuales correspondan a 3.99°C para el mes de abril de 2020 y 1.44°C en el mes de junio del 2021; periodo en la cubierta verde extensiva se encuentra en funcionamiento. De esta manera, se determina una reducción entre los diferenciales de temperaturas promedio equivalente a 2.55°C.

Es de aclarar, que a pesar de los inconvenientes detallados en la sección 6.8 relacionados con el sistema de medición externo instalado en el techo, el termómetro ubicado en el interior de la habitación en ningún momento ha dejado de registrar datos, por lo que se obtuvo este análisis se está pudiendo llevar a cabo con los datos experimentales.

Siguiendo con la comparación entre los meses de abril de 2020 y de junio de 2021, se encontraron que los valores máximos y mínimos de temperatura interna de la habitación para el mes donde la cubierta estaba en funcionamiento (junio 2021), corresponden a 28,87°C y 22.2°C, respectivamente. Esto, en contraste con información extraída de la tabla 15, en los cuales se registraron valores de 34.7°C para la temperatura máxima y de 22.4°C para la temperatura mínima, se genera una reducción representativa para las temperaturas máximas registradas de 5.83°C. Con respecto a las mínimas, la reducción se considera no representativa, 282 pero esto a su vez demuestra una estabilización térmica dada la presencia de la cubierta verde extensiva.

Una tabla a manera de resumen con la información antes mencionada del mes de junio corresponde a la siguiente:

| Modo obtención datos/Rangos temperatura | Termómetro Elitech /Arduino (Interior habitación) |
|---|---|
| T°C máxima | 28,87 |
| Fecha | 3/06/2021 |
| Hora | 2:20 p. m. |
| T°C mínima | 22,2 |
| Fecha | 12/06/2021 |
| Hora | 6:04 a. m. |

Tabla 15 - Tabla resumen temperaturas máximas y mínimas registradas en la habitación con presencia de cubierta verde

Fuente: Autores

Como se ha dicho, durante el desarrollo del proyecto se realizaron mediciones experimentales de valores de temperatura con dos tipos de equipos (Elitech y sistemas compatibles con Arduino), los cuales a lo largo del proyecto sufrieron daños definitivos o imprecisión en los datos requiriendo de atención, pues al final de la investigación se hallaron recomendaciones en estos errores que consistían en el uso de aluminio para aislar las termocuplas y obtener valores de temperaturas cercanos a la realidad; junto a esto se constató la falta de equipos de calidad empleados por diversos autores con márgenes de precisión de ± 0.3 en contraste con los utilizados con ± 0.5 de exactitud.

Finalmente, haciendo un seguimiento a los datos de temperatura de la habitación registrados desde el 11 de mayo al 30 de junio, se obtiene la siguiente ilustración:

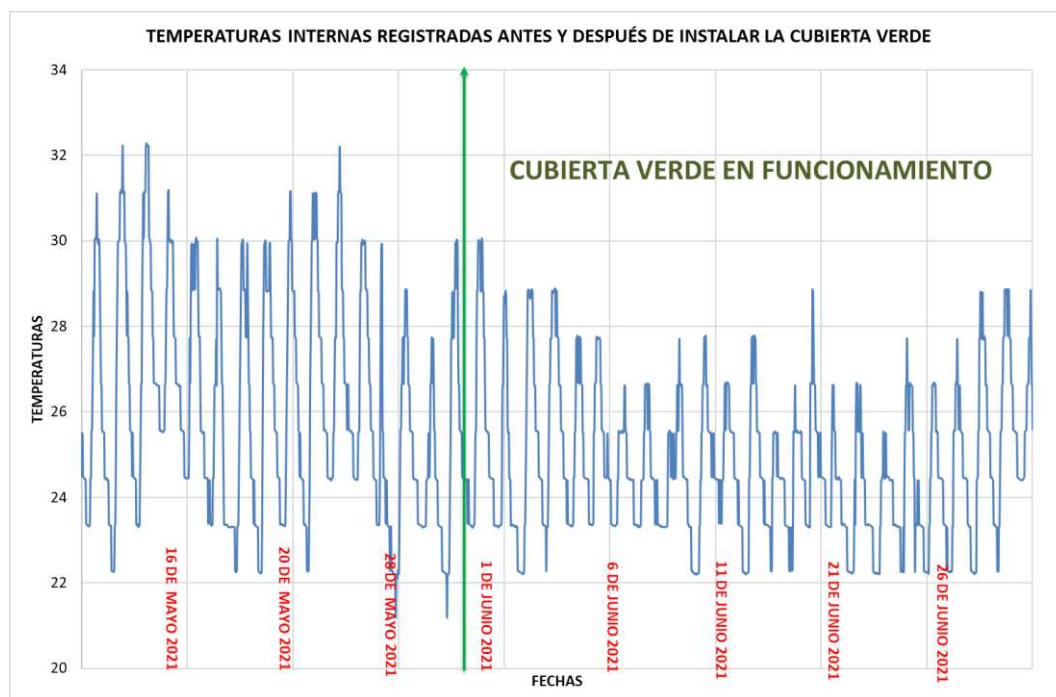


Ilustración 70 - Temperaturas registradas antes y después de instalar la cubierta verde

Fuente: Autores

Con base en la ilustración 70, se puede observar de manera visual la reducción de las temperaturas medidas en la habitación de la unidad de vivienda al instalar la cubierta verde extensiva. En adición, se adjunta valores máximos, promedios y mínimos registrados con la implementación de esta con los cuales se permite comprender la magnitud de reducción de las temperaturas de la habitación.

Estos corresponden a:

| Modo obtención datos/Rangos temperatura | Termómetro Elitech /Arduino (Interior habitación) | Termómetro Elitech /Arduino (Interior habitación) |
|---|---|---|
| | Estructura original | Cubierta verde instalada |
| T°C máxima | 32,8 | 28,87 |
| Fecha | 14/05/2021 | 3/06/2021 |
| Hora | 14:06 p.m. | 2:20 p. m. |
| T°C mínima | 21,18 | 22,2 |
| Fecha | 28/05/2021 | 12/06/2021 |
| Hora | 5:39 a.m. | 6:04 a. m. |

Tabla 16 - Temperaturas máximas y mínimas antes y después de instalada la cubierta verde

Fuente: Autores

Concluyendo el análisis, se obtiene una temperatura promedio antes de instalada la cubierta vegetal correspondiente a 26.1°C en comparación del escenario con cubierta verde obteniendo un diferencial de temperatura media de 1.36°C. Con respecto a la tabla 16 y comparando el cambio de temperaturas máximas y mínimas de la habitación con la instalación de la cubierta verde, se obtienen diferenciales de temperatura de 3.93°C y 1.02°C respectivamente, demostrando reducciones significativas para las temperaturas máximas, pero de acuerdo con lo analizado en el presente capítulo, se espera que esta diferencia aumente con el incremento tanto del LAI junto a la tasa de Cobertura Fraccional del follaje como se ha venido referenciando anteriormente y teniendo en cuenta la importancia de estos en la reducción de la temperatura superficial.

CONCLUSIONES

Por medio del análisis de los diferentes modelos de transferencia de calor validados y contemplados, se lograron ampliar los conocimientos referentes a los principios básicos de transferencia de calor para así contar con los criterios de selección adecuados en la adaptación y aplicación para un modelo de transferencia de calor que permitiera determinar la temperatura interna de una habitación sometida a la presencia de una cubierta verde extensiva.

El modelo adaptado comprendió únicamente la aplicación, más no una validación, por lo que los cambios efectuados al mismo se realizaron con el fin de facilitar la obtención de resultados respetando los criterios preestablecidos por los autores de referencia; a su vez, se evidenció a lo largo de la investigación la necesidad de profundizar en conceptos asociados al movimiento de agua contemplado en los balances de energía y masa para el FASST y para el balance de energía del modelo escogido, el proceso de flujo de calor por convección junto al análisis de las propiedades termodinámicas implicadas en este último tipo de transferencia de calor asociado al escenario el cual contempla el techo sin vegetación con un $S_f = 0$.

Por medio de la caracterización realizada se logró identificar el estado de la cubierta a intervenir donde, contaba principalmente, con materiales de construcción como madera zapan y pino cipres para la estructura, junto a un manto asfáltico Kraft 80 y teja de arcilla. Entre estos, solo la estructura en madera se conservó, pues, las tejas fueron reemplazadas por un sistema multicapas conformado principalmente por las capas de sustrato, filtrante y drenante, sostenidas por un marco diseñado en aluminio. Por último, el manto asfáltico fue reemplazado por el standar edil 3.2 con el fin de mejorar la durabilidad del manto existente y soportar el punzonamiento leve dada la diferencia de espesores entre sí.

Con base en el análisis de los modelos de transferencia de calor se preseleccionó el de de Konkov originalmente conocido como el FASST, junto al modelo propuesto por Paulo Tabares

y Jelena Srebric del año 2012. Finalmente, obteniendo el valor del ajuste estadístico con el mayor valor de aceptación del 79.89% de los datos en contraste con los otros modelos analizados, se pudo formular el modelo de Tabares y Srebric para adaptarlo y aplicarlo al presente caso de estudio con las condiciones meteorológicas de la zona.

Se obtuvo un error medio cuadrático medio (RMSE) de 9.54°C para el modelo empleado al comparar los datos simulados con los medidos experimentalmente. Esto está relacionado con el ajuste estadístico realizado el cual demostró que el 20.11% de los datos presentan anomalías, por tanto, fueron rechazados y a su vez se atribuye que ambos comportamientos se encuentran directamente relacionados a los diferenciales de temperatura obtenidos entre el aire y el sustrato, los cuales fueron dependientes de la medida experimental registrada a través del sistema de medición compatible con la plataforma Arduino para la variable temperatura del suelo (T_g).

Con base en las temperaturas ambientales promedios registradas en el mes de junio de 2021 (cubierta en funcionamiento), se realizó una comparación en los registros disponibles, con el mes de abril del año 2020, el cual registró temperaturas medias muy similares donde el techo de la vivienda no contaba con la estructura de cubierta verde y se logró identificar una reducción para las temperaturas máximas registradas de 5.83°C , esto demuestra la influencia que la cubierta verde extensiva genera en la temperatura interna de la habitación dadas ciertas condiciones meteorológicas.

Durante la adaptación del modelo de transferencia de calor por medio del lenguaje de programación en R se encontró que a través del paquete Open-Air es posible realizar un mejor análisis de los datos meteorológicos, así como el compilado de estos a la hora de graficar, pero dado el alcance del proyecto, se optó por emplear la herramienta Excel para realizar el análisis de los datos simulados en la consola de RStudio.

Se llevó a cabalidad la construcción de la cubierta verde extensiva propuesta al caso de estudio cumpliendo con los parámetros estipulados por la norma NSR-10, dada la necesidad de implementar un refuerzo estructural. Además, se realizó el diseño teniendo en cuenta los requerimientos y especificaciones para la construcción de una cubierta verde en un techo con pendiente fuerte (23°).

A través de la implementación del modelo de optimización financiera se estableció que la mejor opción correspondió a la cubierta verde con capa impermeable de manto asfáltico generando una TIR de 10.64%, lo que representa una mayor rentabilidad para los inversionistas del proyecto y a su vez se concluye que los dos métodos (Newton-Raphson y Tanteos) empleados para la determinación de dicha Tasa, son completamente válidos en la aplicación de cualquier proyecto en general debido a que ambos mostraron iguales resultados para los dos escenarios contrastados.

Con base en la investigación teórica, en la caracterización, y los modelos financieros de optimización no lineal y el de transferencia de calor, se tuvieron en cuenta inicialmente, diversos materiales que influían en los modelos; sin embargo, dado los problemas presentados con la asamblea del conjunto residencial, tal como se mencionó en el desarrollo del proyecto, la decisión posterior se basó en la alternativa que a través de la optimización financiera, representara una rentabilidad superior ante los financiadores del proyecto y del mismo modo generar el mejor beneficio junto a la configuración de los elementos constructivos de dicha inversión.

Por otra parte, se determinó que el costo por metro cuadrado el proyecto desarrollado es de \$ 355.997 lo cual se halla 1.5 veces por encima del promedio encontrado en el sector de cubiertas verdes, debido a la necesidad de la aplicación de un refuerzo estructural y un sistema de antideslizamiento a causa de la configuración de la edificación existente, lo cual representa

un reto a nivel económico para cualquier proyecto que posea características estructurales similares a las del caso de estudio.

Dada las condiciones impartidas por medio del Gobierno local y nacional a causa de la pandemia generada por el Covid-19, surgieron diversos problemas y contratiempos para la adquisición de equipos y materiales; donde, el más influyente corresponde a la adquisición de los datos meteorológicos disponibles en el campus de la UPB, sin embargo, fue posible resolver este último problema de vital importancia gracias a la información suministrada por parte del Instituto Colombiano de Petróleos ICP a lo largo de toda la investigación.

RECURSOS – PRESUPUESTOS

El siguiente presupuesto fue realizado teniendo en cuenta todos los costos y gastos generados en el proyecto de investigación de la construcción de la cubierta verde extensiva. Los valores unitarios de los ítems fueron recopilados de las diferentes facturas de compra de todos los elementos usados en el techo ajardinado ubicado en cercanías a la UPB seccional Bucaramanga.

| COSTOS CUBIERTA VERDE CON MANTO ASFÁLTICO DE CAPA IMPERMEABLE | | | | | | FUENTES DE FINANCIACIÓN | |
|---|---|------|-------|------------|---------------------|-------------------------|-----|
| ÍTEM | DESCRIPCIÓN | UN D | CANT. | UNITARIO | TOTAL | R. PROPIOS | UPB |
| 1 | PERSONAL | | | | | | |
| 1,1 | Director de proyecto de grado | hora | 28 | \$45.000 | \$1.260.000 | | X |
| 1,2 | Autores (2) | hora | 1200 | \$7.000 | \$4.200.000 | X | |
| SUBTOTAL PROCESO DE TALENTO HUMANO= | | | | | \$5.460.000 | | |
| 2 | IMPERMEABILIZACIÓN | | | | | | |
| 2,1 | Manto asfáltico para protección de goteo y humedad de la cubierta existente | und | 4 | \$ 80.000 | \$ 320.000 | X | |
| 2,2 | Manto metaltex pro para traslapos entre cubierta y teja existente | und | 1 | \$ 120.000 | \$ 120.000 | X | |
| 2,3 | Mano de obra persona capacitada y con experiencia en aplicación (Incluye herramientas, elementos para aplicación como cilindro de gas, el ayudante y desmonte de tejas) | und | 1 | \$ 780.000 | \$ 780.000 | X | |
| 2,4 | Galón de emulsión asfáltica para protección de juntas y traslapos entre el manto aplicado con las tejas y la respectiva capa de impermeabilización de metaltex | und | 1 | \$ 25.050 | \$ 25.050 | X | |
| SUBTOTAL PROCESO DE IMPERMEABILIZACIÓN= | | | | | \$ 1.245.050 | | |
| 3 | EMPOTRAMIENTO DEL MARCO, DIVISIONES EN PERFILES Y PLATAFORMA PARA MTTO | | | | | | |
| 3,1 | Perfiles 4x1 para el borde del marco de la cubierta verde | und | 5 | \$ 51.800 | \$ 274.000 | X | |

| | | | | | | | |
|---|--|-------|--------|------------|---------------------|---|--|
| 3,2 | Perfiles aguas negras 3/4" x 1.5mm x 6m para las divisiones del sustrato | und | 7 | \$ 30.700 | \$ 229.900 | X | |
| 3,3 | Lámina machimbre PVC para protección del deslizamiento de la tierra | und | 5 | \$ 30.000 | \$ 165.000 | X | |
| 3,4 | Plataforma para mantenimiento de las plantas | und | 2 | \$ 350.000 | \$ 715.000 | X | |
| 3,5 | Soldador para elaboración de marcos y plataformas. Incluye equipos y elementos necesarios para la labor | día | 6 | \$ 100.000 | \$ 600.000 | X | |
| SUBTOTAL ELABORACIÓN MARCO, PLATAFORMA Y PERFILES= | | | | | \$ 1.983.900 | | |
| 4 | CAPAS CUBIERTA VERDE Y SUSTRATO | | | | | | |
| 4,1 | Plástico poliembalse para protección adicional de las raíces en el manto asfáltico | ml | 6 | \$ 8.000 | \$ 48.000,00 | X | |
| 4,2 | Geodren lámina drenante hidrotec | m2 | 40 | \$ 27.324 | \$ 1.092.99 | X | |
| 4,3 | Componentes sustrato | | | | | | |
| 4,4 | Piedra perlita mineral para aligerar la carga del sustrato. No incluye costos de envío desde Bogotá a Bucaramanga. Presentación de 30Kg equivalente a 60L | bulto | 17 | \$ 80.000 | \$ 1.360.000 | X | |
| 4,5 | Abono orgánico humus de lombriz con aporte de microorganismos benéficos para el suelo. Alto contenido de nitrógeno y pH neutro. Presentación de 100L. No incluye costos de envío desde Bogotá a Bucaramanga. | bulto | 10 | \$ 45.000 | \$ 450.000 | X | |
| 4,6 | Tierra negra orgánica para complementar el sustrato y cumplir con la conductividad térmica esperada | m3 | 1 | \$ 130.000 | \$ 130.000 | X | |
| 4,7 | Geotextil no tejido de espesor 1600 PP o 1,6mm | und | 35 | \$ 3.499 | \$ 122.493 | X | |
| SUBTOTAL CAPAS CUBIERTA VERDE Y SUSTRATO= | | | | | \$ 3.203.484 | | |
| 5 | ESPECIES DE PLANTAS | | | | | | |
| 5,1 | Plantas sembradas 4 meses anteriores al montaje de la cubierta verde para sembrar y generar propagación | | | | | | |
| 5,2 | <i>Sedum Soleirolia Soleirolii</i> (Lágrima de ángel, suegra, bebé, etc.) | und | 5,00 | \$6.500 | \$ 32.500 | X | |
| 5,3 | Plantas adquiridas 1 semana antes del montaje para ser trasplantadas | | | | | | |
| 5,4 | Portulaca grandiflora | und | 100,00 | \$ 3.000 | \$ 555.000 | X | |
| 5,5 | Bulto de maní forrajero (especie autóctona) para cubrir un agua completa del techo | und | 1 | \$ 40.000 | \$ 40.000 | X | |

| | | | | | | | |
|--|---|-----|-----------|---------|----------------------|----------------------|---------------------|
| SUBTOTAL ESPECIES DE PLANTAS= | | | | | \$ 627.500 | X | |
| TOTAL CUBIERTA VERDE INCLUYENDO MANO DE OBRA DEL MONTAJE= | | | | | \$ 7.765.927 | | |
| 6 | Gastos Generales | | | | | | |
| 6,1 | Refuerzo estructural de la habitación | und | 3.450.000 | \$ 1,00 | \$ 3.450.000 | X | |
| 6,2 | Sensores para monitoreo de variable y humedad | und | 730.000 | \$ 1,00 | \$ 730.000 | X | |
| 6,3 | Gastos adicionales (madera prototipos, pintura marcos, aislación sistemas de medición, etc) | und | 450.000 | \$ 1,00 | \$ 450.000 | X | |
| 6,4 | Acarreos y envíos de productos | und | 120.000 | \$ 3,00 | \$ 360.000 | X | |
| SUBTOTAL GASTOS GENERALES= | | | | | \$ 4.990.000 | | |
| COSTO TOTAL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN INCLUYENDO GASTOS ADICIONALES AL MONTAJE DE LA CUBIERTA VERDE | | | | | \$ 21.709.934 | \$ 20.449.934 | \$ 1.260.000 |

Tabla 17 - Costos completos de toda la investigación incluyendo construcción y gastos generales

Fuente: Autores

REFERENCIAS

- Acevedo, H., Alejandro, A., Hernández, V., Alejandro, D., & Cardona, R. (2019). *Sostenibilidad: Actualidad y necesidad en el sector de la construcción en Colombia*. *Sustainability: Actuality and necessity in the construction sector in Colombia*, 15(2012), 1–13.
- Acuerdo 418 de 2009 Concejo de Bogotá D.C. (n.d.).
- Aguilar Carrillo, A. M., Ramírez Quintana, K. A., & Muñoz Barreto, W. G. (2020). *Características sostenibles empleadas en proyectos de construcción más destacados en Colombia*.
- Albarracín Novoa, W. (2016). *Las cubiertas verdes y su implicación en las estructuras, desde el punto de vista del diseño, lo económico y la sostenibilidad ambiental*. June.
- Albert, M., & Krajieski, G. (1998). *Fast, physically based point snow melt model for use in distributed applications*. 12, 1809–1824.
- Alchapar, N. L., Correa, E., & Alicia, C. (2018). ¿Techos reflectivos o verdes? *Cuadernos de Vivienda y Urbanismo*, 11(2), 1–23.
<https://doi.org/https://doi.org/10.11144/Javeriana.cvu11-22.trvi>
- Alchapar, N. L., Correa, E., & Cantón, A. (2018). ¿ Techos reflectivos o verdes ? Reflective or Green Roofs ? *Cuadernos de Vivienda y Urbanismo*, 11(2), 1–23.
<https://doi.org/https://doi.org/10.11144/Javeriana.cvu11-22.trvi>
- Alexandri, E., & Jones, P. (2009). *Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates*. 43, 480–493.
- Allen, Pereira, Raes, & Smith. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing*

crop requirements.

Allen, R. G., Pruitt, W. O., James L, W., Terre A, H., Ventura, F., Snyder, R., Itenfisu, D., Steduto, P., Berengena, J., Baselga Yrisarry, J., Smith, M., Pereira, L. S., Raes, D., Perrier, A., Alves, I., Walter, I., & Elliott, R. (2006). *A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith methd.* 81(1–2), 1–22.

Angel Ejade, L. (2008). *Temperatura y urbanización en Bogotá una mirada a las tendencias espacio-temporales de la temperatura del aire en relación a los procesos de urbanización.* [Pontificia Universidad Javeriana].
https://oab.ambientebogota.gov.co/?post_type=dlm_download&p=3883

Aporte del sector de la construcción a la economía colombiana. (n.d.).

Área Metropolitana del Valle de Aburrá & Universidad Pontificia Bolivariana. (2015). *Guías de Construcción Sostenible.*

Argos. (2010). *Cinco tendencias en construcción que marcarán el 2020.*

Armin Fügenschuh, I. V., & Stegan N. Grösser, R. L. G. (2014). *Modern Nonlinear Optimization Techniques for an Optimal Control of System Dynamics Models.* 08(March).

Ayata, T., Tabares-Velasco, P. C., & Srebric, J. (2011). An investigation of sensible heat fluxes at a green roof in a laboratory setup. *Building and Environment*, 46(9), 1851–1861.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.03.006>

Balick, L. K., Link, L. E., & Scoggins, R. K. (1981). *Thermal modeling of terrain surface elements.* U. S. Army Engineer Waterways Experiments Station.

Balick, L. K., Scoggins, R. K., & Link, L. E. (1981). *Inclusion of a Simple Vegetation Layer in Terrain Tmperatura Models of Thermal IR Signature Prediction.* 3, 143–152.

- Barragán, A. (2016). Diseño de vivienda ecosostenible en el alto magdalena de colombia: proyecto innovador para el desarrollo sustentable. *Lámpsakos*, 0(15), 59–68. <http://funlam.edu.co/revistas/index.php/lampsakos/article/view/1728/1506>
- Bejan, A. (2013). *Convection heat transfer* (Fourth edi).
- Benavides Muñoz, H. M. (2007). *Aplicación de métodos numéricos en el análisis financiero. Determinación de la TIR por el método de Newton Raphson. February 2007.*
- Beneficios de una cubierta vegetal - Sempergreen.* (n.d.).
- Best, M. J. (1998). A model to predict surface temperatures. *Boundary-Layer Meteorology*, 279–306.
- Boer, H. (2004). The implementation process of standardisation. *Manufacturing Techonology Management, June*. <https://doi.org/10.1108/17410380410535035>
- Borges Serradell, E. (2018). *La cubierta verde como alternativa económica y sostenible a las cubiertas convencionales.* <https://rua.ua.es/dspace/handle/10045/79788#.XGWXwl2kzZw.mendeley>
- Breuning, J. (2014). *The Economics of Green Roofs from the Perspective of the Commercial Client.* 1–6.
- CAMACOL. (n.d.). *Informe de Productividad.*
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2012). *Termodinámica: Vol. Séptima ed.*
- Chanampa, M., Vidal, P., Alonso, J., Touceda, M. I., Oliveri, F., Guerra, R., Neila, J., & Bedoya, C. (2010). *Tecnologías verdes como instrumentos de rehabilitación arquitectónica.*
- Chen, J. (2021). *Normal Distribution.*

<https://www.investopedia.com/terms/n/normaldistribution.asp>

Cidell, J. (2009). *Building Green : The Emerging Geography of LEED-Certified Buildings and Professionals*. May. <https://doi.org/10.1080/00330120902735932>

DANE. (2009). *Misión para el Empalme de las Series de Empleo, Pobreza y Desigualdad MESEP*.

Datta, S., Taghvaeian, S., & Stivers, J. (2018). *Understanding Soil Water Content and Thresholds for Irrigation Management*. <https://extension.okstate.edu/fact-sheets/understanding-soil-water-content-and-thresholds-for-irrigation-management.html>

De La Cavada, I. D. R. (1967). Aerodinámica. *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952.

Deardoff, J. W. (1978). Efficient prediction of ground surface temperatura and moisture, with inclusion of a layer vegetation. *Geophysical Research*, 1889–1903.

Dellepiane, S. (2014). *Ciudades + verdes*.

Díaz Marín, K. A. (2017). *Implementación De Techos Verdes En El Centro Comercial Palatino De Bogotá*.

Dickinson, R. E., Henderson-Sellers, A., Kennedy, P. J., & Wilson, M. F. (1986). *Biosphere-atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR Community Climate Model* [University Corporation for Atmospheric Research]. <https://opensky.ucar.edu/islandora/object/technotes:383>

Domingo, A. M. (2011). Apuntes de transmision de calor. *Universidad Politecnica de Madrid*, 34–37.

Echeverria, A., & Miguel, A. (2009). *SISTEMAS ALTERNATIVOS DE REFRIGERACIÓN*

CON BAJO IMPACTO EN EL AMBIENTE.

- Florez Cortez, O. O. (2013). *APRENDE ARDUINO - Guía Teórico Práctica*. Ingeniería Nacional.
- Frankenstein, S., & Koenig, G. G. (2004a). *FASST Vegetation Models*. *b*.
- Frankenstein, S., & Koenig, G. G. (2004b). *Fast All- season Soil STrength (FASST)*. *a*(September).
- Gaffin, S. R., Rosenzweig, C., Parshall, L., Beattie, D., Berghage, R., Keeffe, G. O., & Braman, D. (2005). *Energy Balance Modeling Applied to a Comparison of Green and White Roof Cooling Efficiency*. 15–27.
- Garcia Villalobos, I. (2010). Beneficios de los sistemas de naturación en las edificaciones. *XXXIV Nacional Semana Energia Solar*, 52, 1–5.
http://www.paginaspersonales.unam.mx/files/251/BENEFICIOS_SISTEMAS_NATURACION_ILSE.pdf
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Beneficios+de+los+sistemas+de+naturaci?n=en+las+edificaciones#0>
- Gargari, Caterina, Bibbiani, C., Fantozzi, F., & Campiotti, C. (2016). *Simulation of the thermal behavior of a building retrofitted with a green roof: optimization of energy efficiency with reference to Italian climatic zones*. 628–635.
- Guerra Sache, X. A., & Jaramillo Villacías, A. A. (2015). *Caracterización física, mecánica y térmica de materiales vernáculos de la región sierra del Ecuador* [Escuela Politécnica Nacional]. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/12566/1/CD-6662.pdf>
- Herbs, W. R., Janke, B., Mohseni, O., & Stefan, H. G. (2008). Ground surface temperature for different land covers. *Hydrology* 356, 237–343.
- Hillel, D. (1998). *Enviromental Soil Physics*.

- Holcombe, J. D., Elder, K., Frankenstein, S., Fassnacht, S., & Davis, R. E. (2004). *Seasonal simulations of snow depth and soil moisture at two different NASA CLPX sites.*
- Hornbeck, R. . (1975). *Numerical methods.*
- Incropera, & Dewitt. (2002). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer.*
- Johansen, O. (1975). *Thermal conductivity of soils - U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory.*
- Johnson, P. M., Pinargote, F. M., & Guingla, V. P. (2013). *Plan de negocios: Eco-Roofs.*
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL.
- Jones, H. G. (1992). *Plants and microclimate.*
- Kahle, A. B. (1977). A simple thermal model of the earth's surface for geologic mapping by remote sensing. *Geophysical Research*, 82, 1673–1680.
- Konkov, D. (2018). *Development and Application of an Advanced Green Roof Model.* May.
- Kosareo, L., & Ries, R. (2007). *Comparative environmental life cycle assessment of green roofs.* 42, 2606–2613.
- Kreith, F. (1970). *Principios de transferencia de calor.*
- Kreith, F., Manglik, R. M., & Bohn, M. S. (2011). *Principios de transferencia de calor.*
CENGAGE Learning.
- Kumar, R., & Kaushik, S. C. (2005). *Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings.*
- Lara Salazar, G. E. (2014). *Diseño sísmoresistente de conexiones emperradas de acero en edificios.*
- Los riesgos del aire acondicionado y cómo protegernos de ellos - BBC News Mundo.* (n.d.).

- Machado, M., Brito, C., & Neila, J. (2000). The ecological roof as material of construction. *Informes de La Construcción*, 52(467). <https://doi.org/10.3989/ic.2000.v52.i467.705>
- Martínez Segovia, E. E. (2015). *Influencia de la concentración y dispersión de estructuras gráficas (Grafito y nano placas de Grafito - GNP) sobre la conductividad térmica de compuestos de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) empleando mezclado en fundido*. [Centro de investigación en química aplicada]. https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/98/1/Tesis_DTP_Esperanza_Elizabeth_Mtz_Segovia_Ago_19_2016.pdf
- McKinsey & Company, C. (n.d.). *Una apuesta en construcción: mayor productividad, menores riesgos*.
- Meadow, D. H., Meadows, D. I., Randers, J., & Behrens, W. W. (1972). The Limits to Growth : A Report to The Club of Rome. *The Club of Rome*, 1–9.
- Menenhall, W., Beaver, R. J., & Beaver, B. M. (2006). *Introducción a la probabilidad y estadística - Décimo tercera edición*. <https://www.fcfm.buap.mx/jzacarias/cursos/estad2/libros/book5e2.pdf>
- Mete, M. R. (2014). Valor Actual Neto Y Tasa De Retorno: Su Utilidad Como Herramientas Para El Análisis Y Evaluación De Proyectos De Inversión. *Fides et Ratio - Revista de Difusión Cultural y Científica de La Universidad La Salle En Bolivia*, 7(7), 67–85.
- Mohammed Mujahed, M., & Eltahir Elshareif, E. (2017). *Internal rate of return IRR: A New Proposed Approach*. 2(1).
- Morales Santiago, A. C., & Uzcátegui Mojica, Y. M. (2017). *Diseño y factibilidad técnico-económica de una propuesta de techo verde en el edificio Álvaro Beltrán Pinzón de la UIS*.

- Moreno et al. (2014). Techos Verdes en viviendas de estrato 1: Aplicado al barrio Yomasa. In *Techos verdes en viviendas de estrato 1: Aplicado al barrio Yomasa* (Vol. 1, Issue 4).
- Naciones Unidas, F. de P. (2007). *Estado de la población mundial 2007 - Liberar el potencial del crecimiento urbano*.
- Nichau, K., Papakonstantinou, K., Santamouris, M., Tsangrassoulis, A., & Mihalakakou, G. (2001). Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. *Energy and Buildings*, 719–729.
- Nobel, P. S. (1983). *Biophysical plant physiology and ecology*.
- Norma Chilena Oficial NCh. 853, O. 93. (1991). *Conductividad Térmica de Materiales*.
https://www.academia.edu/42541381/I_NORMA_CHILENA_OFICIAL_NCh853_Of91
- Objetivo 11: Ciudades y comunidades sostenibles / El PNUD en Colombia*. (n.d.).
- Ortega Mendoza, A. R., Morales Ramírez, J. D., López de Juambelz, I. R., & Canseco Martínez, M. A. (2010). *DISEÑO DEL MODELO PARAMÉTRICO PARA EVALUAR EL DESEMPEÑO TÉRMICO DE UNA CUBIERTA VERDE*.
- Palomo Del Barrio, E. (1998). *Analysisi of the green roofs cooling potential in buildings*.
- Panorama y evolución del sector de la construcción en Colombia*. (n.d.).
- Pérez, V. (2001). *Evaluación para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico-artístico* [Universidad Politécnica de Cataluña].
<https://upcommons.upc.edu/handle/2117/93528>
- Peris Ortiz, M., Rueda Armengot, C., & Benito Osorio, D. (n.d.). *Matriz de Crecimiento Empresarial*.
- PIQUERAS BLASCO, M. (2016). *Estudio de sistemas de aislamiento térmico en cerramientos*

de hormigón in situ.

Placitelli. (2012). *Techos verdes para reverdecer las ciudades*. 34–45.

Porsche, U., & Köhler, M. (2003). LIFE CYCLE COSTS OF GREEN ROOFS - A Comparison of Germany, USA, and Brazil. *RIO 3 - World Climate & Energy Event, December*, 1–5.

Quzada García, S., Espinosa Paredes, G., Polo Labarrios, M. A., Espinosa Martinez, E. G., & Escobedo Izquierdo, A. (2020). *Green roof heat and mass transfer mathematical models: A review*.

Ramírez, J. A., & Senarath, S. U. S. (2000). A statistical-dynamical parameterization of interception and land surface-atmosphere interactions. *Journal of Climate*.

Rees, W. E. (1996). Revisiting carrying capacity: Area-based indicators of sustainability. *Population and Environment*, 17(3), 195–215. <https://doi.org/10.1007/BF02208489>

Rezaei. (2005). *Evapotranspiration rates from extensive green roof plant species*. Pennsylvania State.

Rosatto, H., Botta, G. F., Tolón Becerra, A., Tardito, H., & Levaratto, M. (2016). Problemáticas del cambio climático en la ciudad Autónoma en Buenos Aires. *Ciencias Agrarias*, 49(1), 219–234.

<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=382846012004%0Ahttp://www.redalyc.org/articulo.oa?id=382853527016>

Rose Forest, R. (2014). *The University of Manchester Green Roof – Green Wall Policy and Guidance*. December. <http://documents.manchester.ac.uk/display.aspx?DocID=33158>

Rossi, G. L., Corsico, A., Roggeri, A., & Moscato, G. (n.d.). Human health and air conditioning systems. *Giornale Italiano Di Medicina Del Lavoro*, 13(1–6), 51–54.

- Sailor, D. J. (2008). A green roof model for building energy simulation programs. *Energy and Buildings*, 40(8), 1466–1478. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.02.001>
- Schwarz, C. (2015). *Green roof energy balances for native grasses and sedum* [University of Nebraska-Lincoln].
<https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1115&context=natresdiss>
- Secretaria distrital de ambiente de Bogota. (2011). *GUIA DE TECHOS VERDES_2011 27 DIC.pdf*.
- Shapiro, R. (1972). *Simple model for the calculation of the flux of solar radiation through the atmosphere*. 11, 760–764.
- Shapiro, R. (1982). *Solar radiative flux calculations from standard surface meteorological observations*.
- Shapiro, R. (1987). *A simple model for the calculation of the flux of direct and diffuse solar radiation through the atmosphere*.
- Sika. (2011). *Hoja técnica - Sarnafil G476 12*.
- Sika. (2018). *HOJA DE DATOS DEL PRODUCTO - Geotextil Sika® PP 1800/2500*.
- Sika. (2019). *HOJA DE DATOS DEL PRODUCTO - Sika® Lamina de Drenaje 32T*.
- Tabares-Velasco, P. C., & Srebric, J. (2011). *A heat transfer model for assessment of plant based roofing systems in summer conditions*.
- Tabares Velasco, P. C. (2009). *Predictive heat and mass transfer model of plant-based roofing materials for assessment of energy savings*. December.
- Tan, P., & Sia, A. (2005). A pilot green roof research project in Singapore. *Third Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference*, 1–13.

- Theodosiou, T. G. (2003). Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique. *Energy and Buildings*, 909–917.
- Urquía, A. (2003). SIMULACION Texto Base de Teoría. *SIMULACION Texto Base de Teoría*, 1–321.
- Vera, S., Pinto, C., Tabares-Velasco, P. C., Bustamante, W., Victorero, F., Gironás, J., & Bonilla, C. A. (2017). *Influence of Vegetation, Substrate, and Thermal insulation of an extensive vegetated roof on the thermal performance of retail stores in semiarid and marine climates*.
- Viecco, M., Vera, S., Jorquera, H., Bustamante, W., Gironás, J., Dobbs, C., & Leiva, E. (2018). Potential of particle matter dry deposition on green roofs and living walls vegetation for mitigating urban atmospheric pollution in semiarid climates. *Sustainability (Switzerland)*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/su10072431>
- Vilches, A., Pérez, D. G., Toscano, J. C., & Macías, O. (2014). *Economía y Sostenibilidad*. January.
- Wang, S. K. (2001). Air Conditioning Systems: System Classification, Selection, and Individual Systems. In *Handbook of Air Conditioning and Refrigeration*.
- Wong, N., Cheong, H., Yan, H., Soh, J., Ong, C. L., & Sia, A. (2003). The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore. *Energy and Buildings*, 4, 353–364.
- Yaghoobian, Neda, & Srebric, J. (2015). *Influence of plant coverage on the total green roof energy balance and building energy consumption*. 1–13.
- Zapata, C. J. (2011). *Confiabilidad en Ingeniería*. 1–154. http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/lapsee/curso_2011_za

pata_1.pdf

Zhang, J. Q., Fang, X. P., Zhang, H. X., Yang, W., & Zhu, C. C. (1996). A heat balance model for partially vegetated surfaces. *Infrared Physics & Technology*, 287–294.

ZinCo. (2011). *Guía técnica de planificación Sistemas para ajardinar cubiertas inclinadas*
Exito duradero con cubiertas ajardinadas en tejados inclinados – ¿ Qué hay que tener en cuenta ?

ZinCo Cubiertas Ecológicas. (2015). *Sistemas para cubiertas verdes extensivas*. 16.

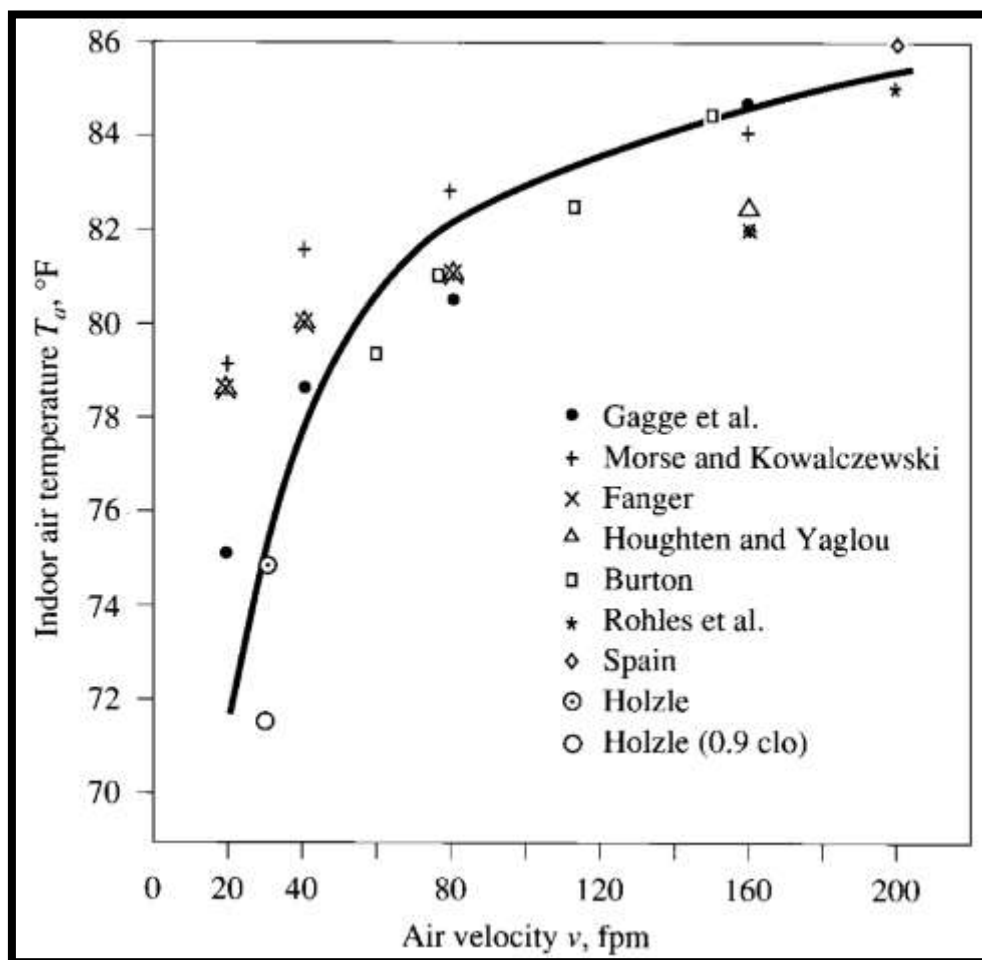
ANEXOS

Anexo I - Espesores y costos cubiertas verdes

| TIPO DE CUBIERTA | TIPO DE AISLANTE | ESPESOR AISLANTE (cm) | PRECIO (€/m ²) |
|--|-------------------|-----------------------|----------------------------|
| Cubierta verde de tipo extensivo con espesor de sustrato de 15 cm. | XPS | 6 | 68,26 |
| Cubierta plana invertida no transitable con protección de grava. | XPS | 11 | 69,86 |
| Cubierta plana invertida no transitable con protección de grava. | XPS | 12 | 71,49 |
| Cubierta plana invertida no transitable con protección de grava. | PUR PROYECTADO | 9 | 75,01 |
| Cubierta plana invertida transitable con pavimento fijo. | XPS | 11 | 78,95 |
| Cubierta plana invertida transitable con pavimento fijo. | XPS | 12 | 80,58 |
| Cubierta inclinada con acabado de teja. | LANA DE ROCA | 16 | 97,04 |
| Cubierta inclinada con acabado de teja. | PUR PROYECTADO | 10 | 111,75 |

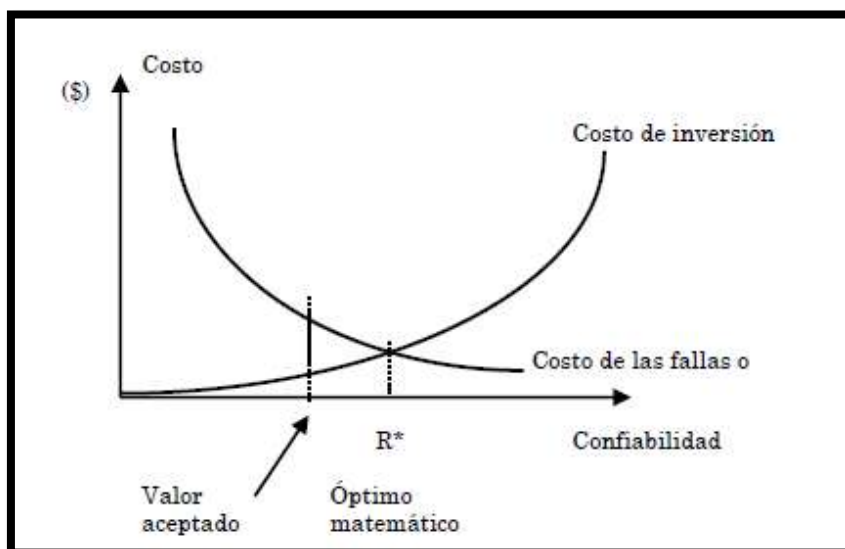
Fuente: (Borges Serradell, 2018), Tabla 8.8. Precios de los distintos tipos de cubierta según tipo y espesor de aislamiento.

Anexo 2 - Temperatura del aire para diferentes velocidades del viento



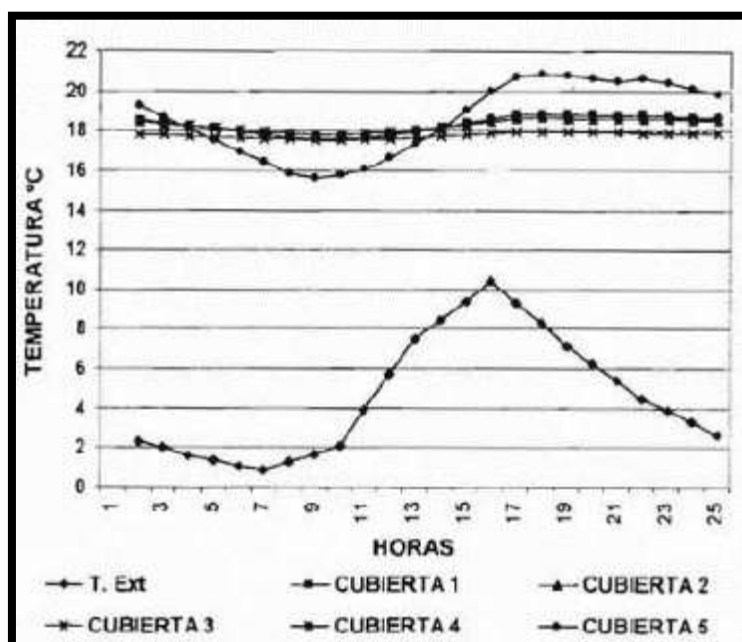
Fuente: (Wang, 2001) , Figura 4.8. Temperaturas del aire de preferencia para diferentes velocidades del viento.

Anexo 3 - Función de costos de la confiabilidad



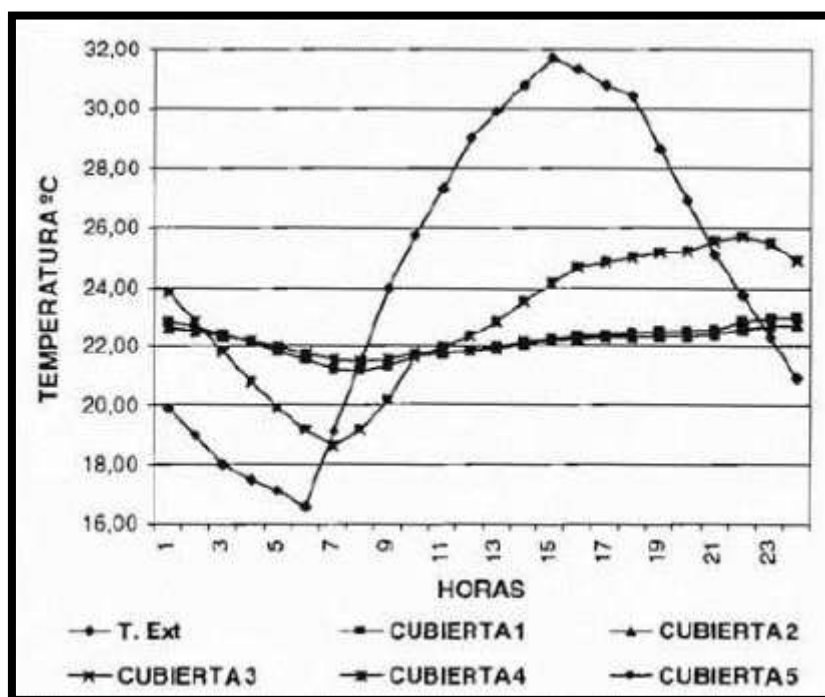
Fuente: (Zapata, 2011), Figura 1.3 Función de costos de la confiabilidad.

Anexo 4 – Temperatura del aire interior en edificios cerrados durante el día y abiertos en la noche en Madrid en el mes de enero.



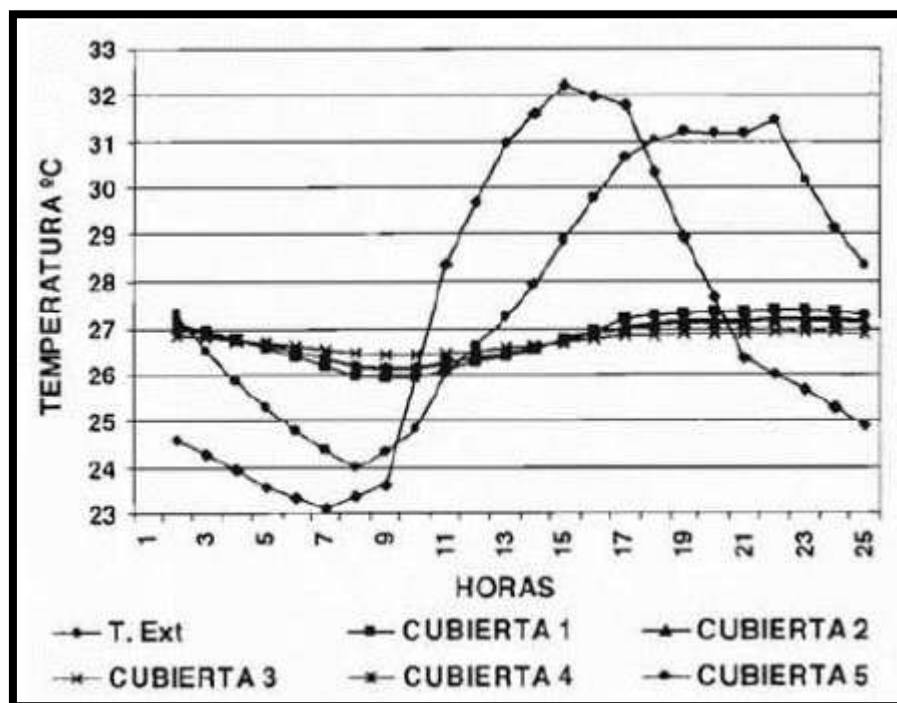
Fuente: (Machado et al., 2000), Figura 9. Temperaturas del aire interior en edificios cerrados durante el día y abiertos en la noche en enero en Madrid.

Anexo 5 – Temperatura del aire interior en edificios cerrados durante el día y abiertos en la noche en Madrid en el mes de Julio.



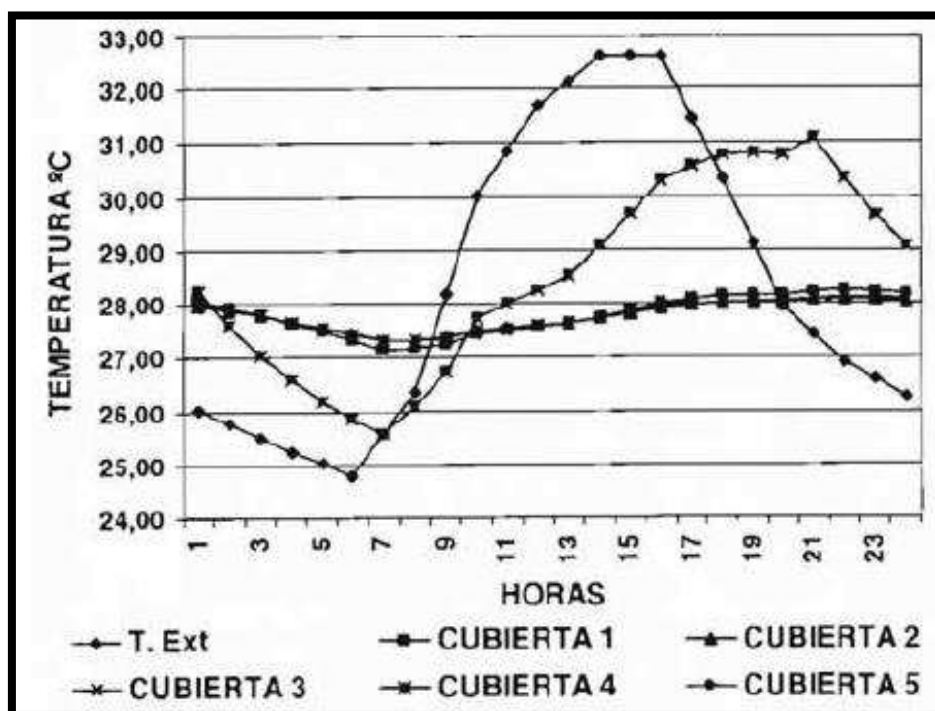
Fuente: (Machado et al., 2000), Figura 10. Temperaturas del aire interior en edificios cerrados durante el día y abiertos en la noche en julio en Madrid.

Anexo 6 – Temperaturas del aire interior en edificios cerrados durante el día y abiertos en la noche en enero en Maracaibo



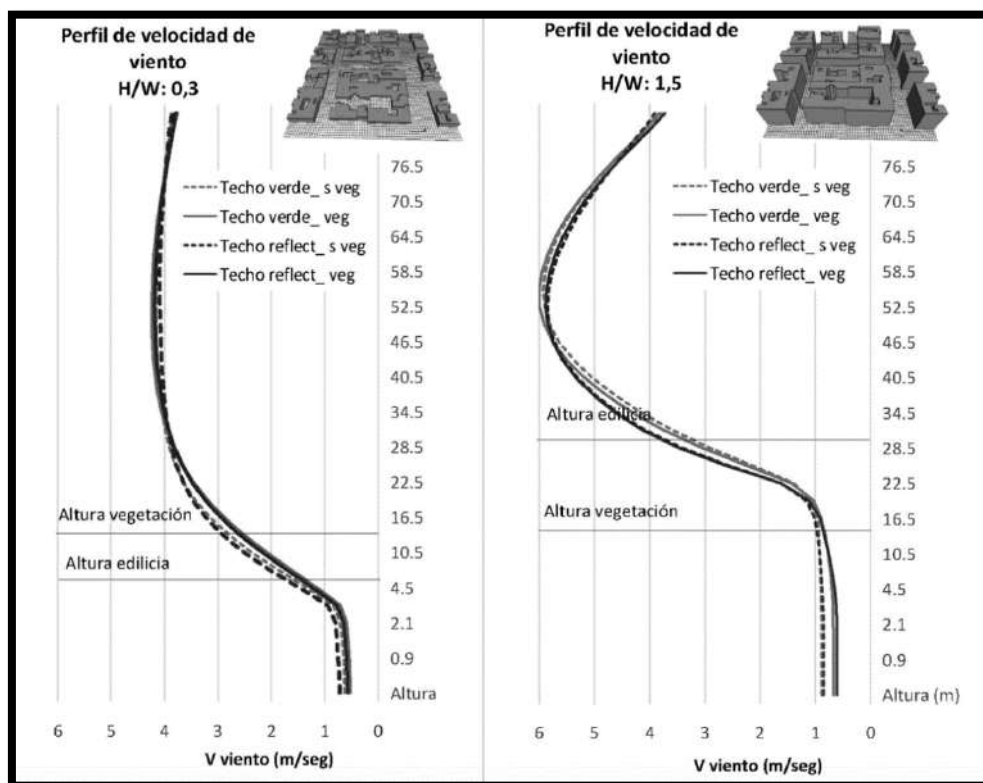
Fuente: (Machado et al., 2000), Figura 11. Temperaturas del aire interior en edificios cerrados durante el día y abiertos en la noche en enero en Maracaibo.

Anexo 7 – Temperaturas del aire interior en edificios cerrados durante el día y abiertos en la noche en julio en Maracaibo.



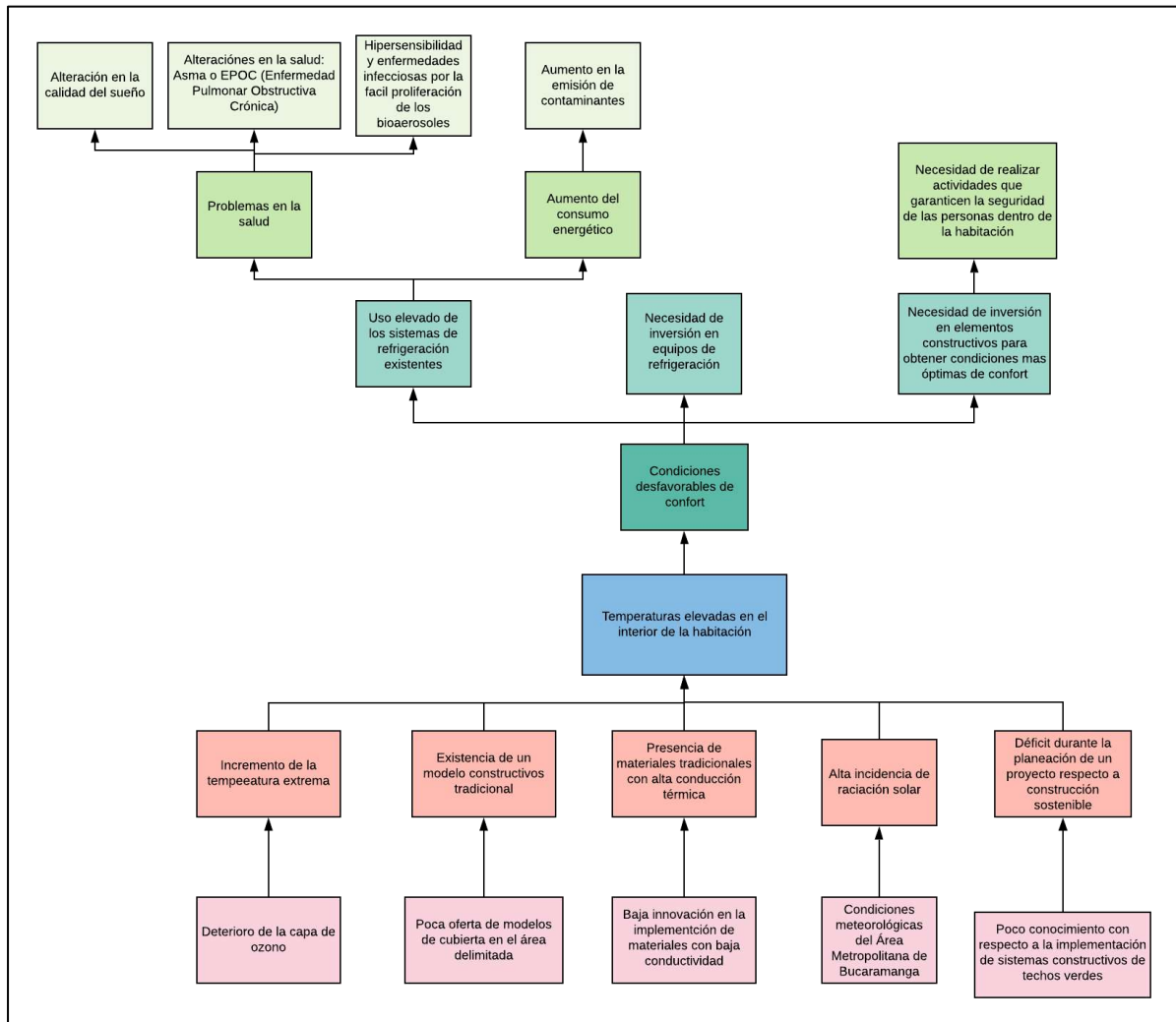
Fuente: (Machado et al., 2000), Figura 12. Temperaturas del aire interior en edificios cerrados durante el día y abiertos en la noche en julio en Maracaibo.

Anexo 8 – Perfil de velocidad de viento según tecnología de techo verde y ratio H/W durante las máximas temperaturas aire.



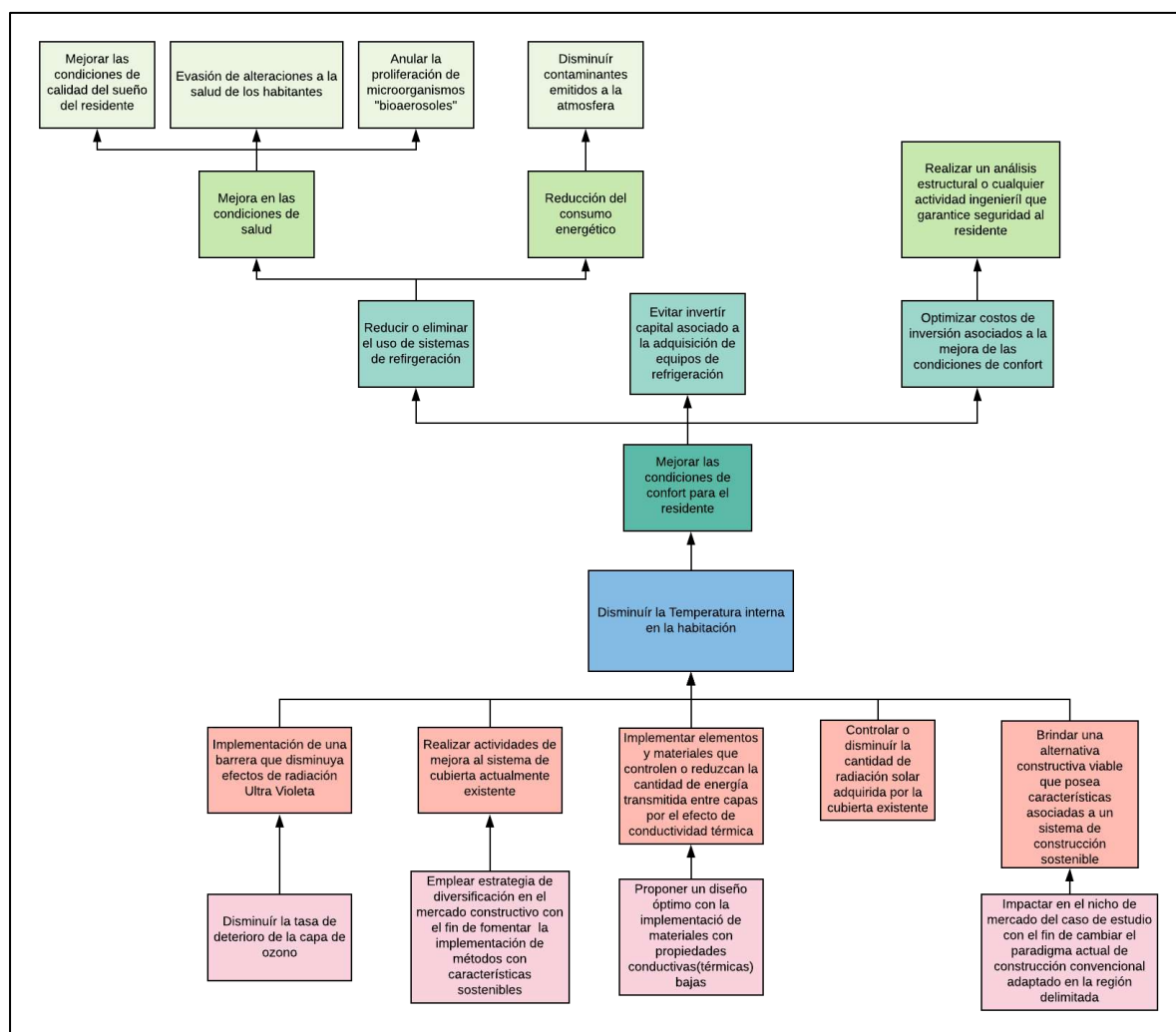
Fuente: (Alchapar, Correa, & Cantón, 2018), Figura 7. Perfil de velocidad de viento(m/s), según tecnología de techo (reflectivo y verde) y aspecto de ratio H/W durante las máximas temperaturas aire (16 h).

Anexo 9 – Árbol de problemas





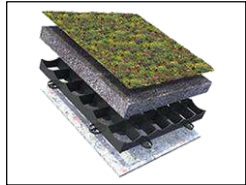
Fuente: Autores.





Anexo 10 – Árbol de objetivos






Fuente: Autores.



Anexo II – Caracterización de los materiales para la construcción de una cubierta verde extensiva




| CARACTERIZACIÓN CUBIERTA VERDE | | | |
|--|--|---|---|
| EMPOTRAMIENTO DEL MARCO | | | |
| TIPO | DESCRIPCIÓN | PRECIO | IMAGEN/CONDUCTIVIDAD TERMICA |
| Perfil rectangular de 4x1 | Tubo rectangular de acero al carbono calibre 19 usado para la fabricación de estructuras livianas, en el caso del presente proyecto para el marco de soporte de la estructura y soporte de la lámina de machimbre de PVC que se explicará en la seguridad antideslizamiento. | Valor unitario |  K= 43 W/m * K (Kreith et al, 2010) |
| | | \$ 51.800 | |
| Perfil aguas negras 3/4" | Tubería de cerramiento para elementos de baja capacidad de carga o no estructurales. Puede ser usado en proyectos urbanos, construcciones livianas, estacas de camionetas, andamios, entre otras aplicaciones. En este caso será usado para generar divisiones transversales en el marco con la finalidad de que las láminas de machimbre de PVC puedan reposar sobre el mismo. | Valor unitario |  K= 43 W/m * K (Kreith et al, 2010) |
| | | \$ 48.540 | |
| | | Valor 7 perfiles | |
| | | \$ 339.780 | |
| SEGURIDAD ANTI-DESLIZAMIENTO | | | |
| TIPO | DESCRIPCIÓN | PRECIO | IMAGEN/CONDUCTIVIDAD TERMICA |
| Láminas de machimbre de PVC Uso: "Cajones" antideslizantes sustrato | Usadas como aislante térmico y acústico en la construcción. Vida útil mayor a 20 años. Fácil manipulación para el corte y en caso de fijarse a algún otro elemento se deberá usar tornillo de para PVC. | Precio por metro cuadrado: |  K= 0,13 - 0,29 W/m * K (Martínez, 2016) |
| | | \$ 16.807 | |
| | | Presentación de 5,95x0,3 | |
| | | \$ 29.916 | |
| Soporte para el sustrato | Rejilla de plástico(negra) fabricada a partir de polietileno de alta densidad HDPE reciclado. Evita el deslizamiento del sustrato. Puede ser unas láminas de acero galvanizado forradas en HDPE. | Empresa contactada a través de correos y números telefónicos, pero no se obtuvo respuesta alguna sobre el costo |  K= 0,33 - 0,53 W/m * K (Martínez, 2016) |




| Bambú (reemplaza listones de madera) | Elemento con la menor conductividad en el caso de la seguridad contra el deslizamiento del sustrato. Para protección contra la humedad se puede usar impermeabilizante como alquitrán o láminas bituminosas o de polietileno. En el presente proyecto no se optó por emplearla debido a que el pedido mínimo son 50 unidades y solo se requirieron 5 como máximo. | Precio por unidad |  |
|---|--|---------------------------------------|---|
| | | \$ 23.900 | |
| | | Precio de 50 unidades (pedido mínimo) | K= 0,049 W/(m*K) (López & Vinicio, 2017) |
| | | \$ 1.195.000 | |
| VEGETACIÓN | | | |
| TIPO | DESCRIPCIÓN | PRECIO | IMAGEN |
| SEDUM - SOLEIROLIA SOLEIROLII Nombre comercial: Lágrimas de ángel | Esta planta comúnmente es conocida como "lágrimas de ángel, lágrimas de bebé, entre otras". Tiene una propagación extensa y ofrece resistencia a la penetración de la radiación del sol por la cantidad de hojas que posee, pues en cortos periodos de tiempo forma "alfombras" o "tapetes" de máximo 10cm de altura. Se desarrolla bien en situaciones cálidas y es relativamente resistente al frío. | Costo por maceta |  |
| | | \$ 6.500 | |
| Portulaca grandiflora pink | Planta muy adecuada para soportar el calor y el sol en los jardines debido a que pueden almacenar agua en los tejidos y soportar largos periodos de sequía y temperaturas altas debido a que absorbe humedad en las raíces. | Costo por maceta |  |
| | | \$ 3.500 | |
| Maní forrajero (Arachis pintoi) | Planta autóctona que se puede propagar por semillas. Se adapta a diferentes condiciones ambientales resistiendo extensas sequías o lluvias prolongadas. También crece bien al sol o a la sombra y fuerte capacidad al enmarchitamiento. | Costo por bulto |  |
| | | \$ 40.000 | |

| SUSTRATOS | | | |
|---|--|--|--|
| TIPO | DESCRIPCIÓN | PRECIO | IMAGEN/CONDUCTIVIDAD TERMICA |
| Tierra negra - Tierra vegetal - Tierra orgánica | Es un sustrato natural orgánico y procesado con componentes nutrientes que garantizan propiedades físicas y químicas necesarias para el adecuado desarrollo de las plantas. | \$ 120.000 |  |
| | Contiene pH regulado, buena retención de humedad, porosidad para la aireación y el drenaje y puede retener abono o fertilizante por 3 meses. Cantidad: 2m3 | \$ 240.000 | Debido a que se generó una combinación de 33% por cada tipo de sustrato, la conductividad es de $K= 0,34 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$ de acuerdo con Tabares. |
| Humus de lombriz | Abono orgánico para todo tipo de plantas. Posee propiedades como buena capacidad de retención de agua, aporte de microorganismos beneficios para el cultivo, sustancias reguladoras, liberación gradual de nutrientes, entre otras. Alto contenido en nitrógeno y pH neutro. | Opción más viable: Confiabonos Bogotá |  |
| | Bioespacio: Presentación en bulto de 50kg o aprox 73L. Cantidad: 14 und | \$ 630.000 | Debido a que se generó una combinación de 33% por cada tipo de sustrato, la conductividad es de $K= 0,34 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$ de acuerdo con Tabares. |
| | Confiabonos: Bulto de 100L. Cantidad: 10 und | \$ 400.000 | |
| | Sembramos.co: Bulto de 100L o 50kg. Cantidad: 10 und | \$ 1.200.000 | |
| Perlita | Es un mineral natural compuesto por silicato de aluminio y pequeñas cantidades de otros elementos. Características como aligerza, pH neutro y bajo nivel de sales. Esponja la tierra, aumenta la retención de humedad, alta capilaridad, mejora aireación y drenaje, etc. | Opción más viable: Bioespacio Bogotá |  |
| | Bioespacio: Presentación en bulto de 30kg (60L) con descuento de 5%. Cantidad: 17 und | \$ 1.105.000 | Debido a que se generó una combinación de 33% por cada tipo de sustrato, la conductividad es de $K= 0,34 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$ de acuerdo con Tabares. |
| | Confiabonos: Bulto de 30Kg - aprox 50L. Cantidad: 20 und | \$ 2.200.000 | |
| | Sembramos.co: Bulto de 100L o 50kg. Cantidad: 10 und | \$ 2.400.000 | |
| | Sembrar (mercado libre): Bulto 10Kg o 25L. Cantidad: 40 und | \$ 1.700.000 | |

| CAPA ANTI-RAÍZ Y FILTRANTE | | | |
|------------------------------|---|---|---|
| TIPO | DESCRIPCIÓN | PRECIO | IMAGEN/CONDUCTIVIDAD TERMICA |
| Geotextil Sika PP 1800/2500 | <p>Membrana sintética no tejida 100% de polipropileno, permeable que sirve para proteger las membranas de PVC/TPO Sikaplan o Sarnafil del punzonamiento. Su principal uso es como protector de la membrana PVC/TPO de punzonamiento inferior dependiendo del grado de irregularidad de la superficie, por lo que se recomienda extenderlo antes. Para este caso cumple la función impermeabilización para cubiertas expuestas, terrazas, cubiertas verdes o ajardinadas.</p> <p>-Fácil implementación -Buena resistencia a raíces y agentes químicos -Resistencia a la contaminación por hongos -No genera putrefacción</p> | \$ 828.657 |  |
| | | \$ 4.604 | |
| | | Presentación: Rollo de 1,80m x 100m | |
| | | \$ 828.657 | K= 0,11 - 0,17 W/(m*K) (Martínez, 2016) |
| Manto Poliéster 40 Anti Raíz | <p>Membrana con espesor de 4mm y un peso de 4kg/m2. Usado para para aislar las capas de jardineras y techos ecológicos verdes de las raíces para impedir que las plantas rompan las demás capas y no requieren de protección de mortero.</p> <p>Espesor 4mm</p> | Se consultó a través de diferentes fuentes para obtener el precio, pero el producto no estaba en distribución en durante la pandemia. |  |
| | | | K= 0,15 - 0,4 W/(m*K) (Martínez, 2016) |
| GEODREN PLANAR | <p>Sistema cuyo objetivo es captar y conducir fluidos en su plazo hacia el sistema de evacuación. Conformado por Getotextiles No Tejidos punzado por agujas y la red drenante. Tiene la función de filtrar, retener las partículas del suelo y permitir el paso al fluido hacia las redes.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Menor capacidad en la exigencia de botaderos • Menor riesgo de colmación en el sistema de drenaje • Flexible se adapta a la Geometría de la obra | Precio por metro cuadrado: |  |
| | | \$ 30.136 | |
| | | Rollo de 1m x 50m (50m2) Costo: | |
| | | \$ 1.506.800 | K= 0,33 - 0,53 W/m * K (Martínez, 2016) |
| Geotextil no tejido 1600 | <p>Manto formado a partir de entrelazados de fibra o filamentos de polipropileno virgen. El geotextil conforma un velo con altas propiedades de filtración y drenaje con espesor aproximado de 1.6mm y resistencia máxima al punzonamiento de 250N.</p> <p>Espesor 1.6mm</p> | Precio por metro cuadrado: |  |
| | | \$ 3.500 | |
| | | Precio 35m2: | |
| | | \$ 122.493 | K= 0,11 - 0,17 W/(m*K) (Martínez, 2016) |



| CAPA DRENANTE | | | |
|----------------------------------|---|---|---|
| TIPO | DESCRIPCIÓN | PRECIO | IMAGEN/CONDUCTIVIDAD TERMICA |
| Sika Drain MS-20 | <p>Es un geocompuesto para sistemas de drenaje con nódulos de 20 mm de altura para drenaje horizontal y agujeros para drenaje vertical. De esta manera se busca agilizar el drenaje de aguas lluvias de exceso y almacenar agua en época de sequía en cubiertas verdes o ajardinadas. Usado principalmente en cubiertas intensivas debido a la amplitud de los nódulos por propiedades como resistencia al aplastamiento, impacta, abrasión, raíces, contaminación por hongos, entre otras más.</p> <p>Espesor 1.2mm</p> | Precio por metro cuadrado: |  |
| | | \$ 55.158 | |
| | | Rollo de 2x20m | |
| | | \$ 2.206.317 | K= 0,33 - 0,53 W/m * K (Martínez, 2016) |
| Sika Lamina de Drenaje 32T | <p>Lámina de polietileno extruido de alta densidad con nódulos de 7 mm. Unión de las láminas por fijación mecánica mediante abotonamiento de los nódulos o con sellantes de caucho. Se usa como lámina de protección y drenaje para cubiertas verdes de tipo extensivo y ajardinadas con sistemas de impermeabilización de membranas PVC/TPO. Se usa para agilizar drenaje de aguas lluvias, aguas de escorrentía, aguas subterráneas y aguas de nivel freático. Posee resistencia mecánica al impacto y abrasión, resistencia a raíces y agentes químicos, entre otras.</p> <p>Espesor 0.44mm</p> | Precio por metro cuadrado: |  |
| | | \$ 20.541 | |
| | | Rollo de 2.0m x 25m | |
| | | \$ 1.027.059 | K= 0,33 - 0,53 W/m * K (Martínez, 2016) |
| TecDren | <p>Es una lámina drenante con resistencia a la compresión y agentes químicos. El diseño se centra en la captación, conducción y evacuación de fluidos de manera segura tanto en aplicaciones horizontales como verticales.</p> <p>Compuesta por un Geotextil en polipropileno unido a una lámina de HDPE (polietileno de alta densidad). El Geotextil TecDren cumple la función de filtración, reteniendo las partículas del suelo y permitiendo el paso de fluidos.</p> <p>Espesor 8.6mm</p> | Precio por metro cuadrado: |  |
| | | \$ 24.433,20 | |
| | | Cantidad de venta 50m2 (presentación única) | |
| | | \$ 1.221.660 | K= 0,22 - 0,35 W/m * K (Martínez, 2016) |
| Geodren lámina drenante Hidrotec | <p>Lámina drenante distribuida por una empresa Colombiana el cual tiene las mismas características que la lámina de drenaje 32T proveída por Sika. Conformada por nódulos de 8mm de alto con capacidad de drenar agua o almacenar según la dirección en la que se coloque.</p> <p>Espesor 8mm</p> | Precio por metro cuadrado: |  |
| | | \$ 27.324,78 | |
| | | Cantidad de venta 40m2 (presentación única) | |
| | | \$ 1.092.991,20 | K= 0,22 - 0,35 W/m * K (Martínez, 2016) |

| CAPA IMPEMEABILIZANTE | | | | |
|---|--|--|---|--|
| TIPO | DESCRIPCIÓN | PRECIO | IMAGEN/CONDUCTIVIDAD TERMICA | |
| Sarnafil G 476-12 | Membrana sintética de Polivinilo de Cloruro (PVC) de primera calidad, de 1.5 mm de espesor, para impermeabilización de cubiertas verdes, según norma EN 13956. Es usada para impermeabilizaciones no expuestas, tanto la membrana como los detalles de acabado máximo pueden quedar 3 meses expuestos a la intemperie. | Precio por metro cuadrado: |  | |
| | | \$ 67.004 | | |
| | -Excelente flexibilidad a bajas temperaturas -Alta estabilidad dimensional -Alta permeabilidad al vapor de agua -No hay riesgo de delaminación o filtraciones de agua -Material reciclable Espesor 1.2mm | Se debe comprar el rollo de 2m x 20m (40m2) | \$ 2.680.189 | K= 0,13 - 0,29 W/(K*m) (Martínez, 2016) |
| | | | | |
| ACCESORIOS PARA APLICACIÓN MEMBRANA SARNAFIL G 476-12 | | | | |
| Sarnacol 2130 | Sarnacol®-2130 (CO) es un adhesivo base agua usado en el sistema de impermeabilización con membrana Sarnafil/Sikaplan adherida en sustratos con capacidad de absorción, pero solamente en superficies horizontales de máximo 10° de pendiente. Cuñete 25kg o tambor 40kg Rendimiento 0,6kg/m2 | \$ 391.436 |  | |
| | | Cuñete de 25 kg | | |
| Sika Metal Sheet | Lámina de acero galvanizado, con un recubrimiento en PVC por una cara y por la otra un recubrimiento epóxico para usar en protección de todos los bordes de la membrana Sarnafil. | \$ 651.192 | | |
| | | Precio por lámina de 1m x 2m | | |
| Sikadur Primer 32 | Es un adhesivo epóxico de dos componentes que mejora la superficie para la posterior impermeabilización. Para preparar la mezcla se debe verter el componente B sobre el A y mezclar con taladro de bajas revoluciones (max 400 r.p.m) o de modo manual hasta obtener una mezcla uniforme. Sirve también como capa impermeable y barrera de vapor de agua. | \$ 280.120 |  | |
| | | Presentación de 3kg Rendimiento de 400gr/m2 | | |

| | | | |
|-----------------|--|--|---|
| Geomembrana TPO | <p>Sistema impermeable de mayor resistencia y durabilidad. Resistencia al punzonamiento y asimila fisuras en losa principal. Tecnología de aplicación con anclajes y termosellado. Durabilidad de 25 a 30 años.</p> <p>Usos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tanques de agua potable - Piscinas - Cubiertas con jardín - Losas de zonas comunes - Cubiertas de último piso <p>Espesor de 1.2mm</p> | Precio por metro cuadrado: |  |
| | | \$ 30.900 | |
| | | Rollo de 52 m2 Costo total: | |
| | | \$ 1.606.800 | |
| Manto asfáltico | <p>Es usada como para protección de las áreas de las diferentes condiciones climáticas. También es un material impermeabilizante producido por la unión de una capa polimérica bituminosa y dos caras sobre una base de poliéster. Este material tiene buena resistencia a altas fluctuaciones de temperatura y altas cargas mecánicas lo que proporciona una impermeabilización a largo plazo.</p> <p>Espesor 3.2mm</p> | Precio por metro cuadrado: |  |
| | | \$ 11.200 | |
| | | Rollo de 10 m2 (Presentación 1x10m) Costo total: | |
| | | \$ 112.000 | |
| Sikaplan 12 R | <p>Es una membrana a base de PVC plastificado, son apropiadas para la impermeabilización de cubiertas con protección pesada. Están diseñadas para su utilización tanto en obra nueva como en rehabilitación de cubiertas existentes. Las membranas cumplen con las normas DIN 16735, UNE 104-416-92, ASTM 1003 y ASTM D 882</p> <ul style="list-style-type: none"> -Elevada durabilidad -Estabilidad dimensional -Excelente flexibilidad -Resistente a microorganismos <p>Espesor 1.2mm</p> | Precio por metro cuadrado: |  |
| | | \$ 42.134 | |
| | | Rollo de 1,55 x 20m Costo total: | |
| | | \$ 1.306.144 | |

Fuente: Propia

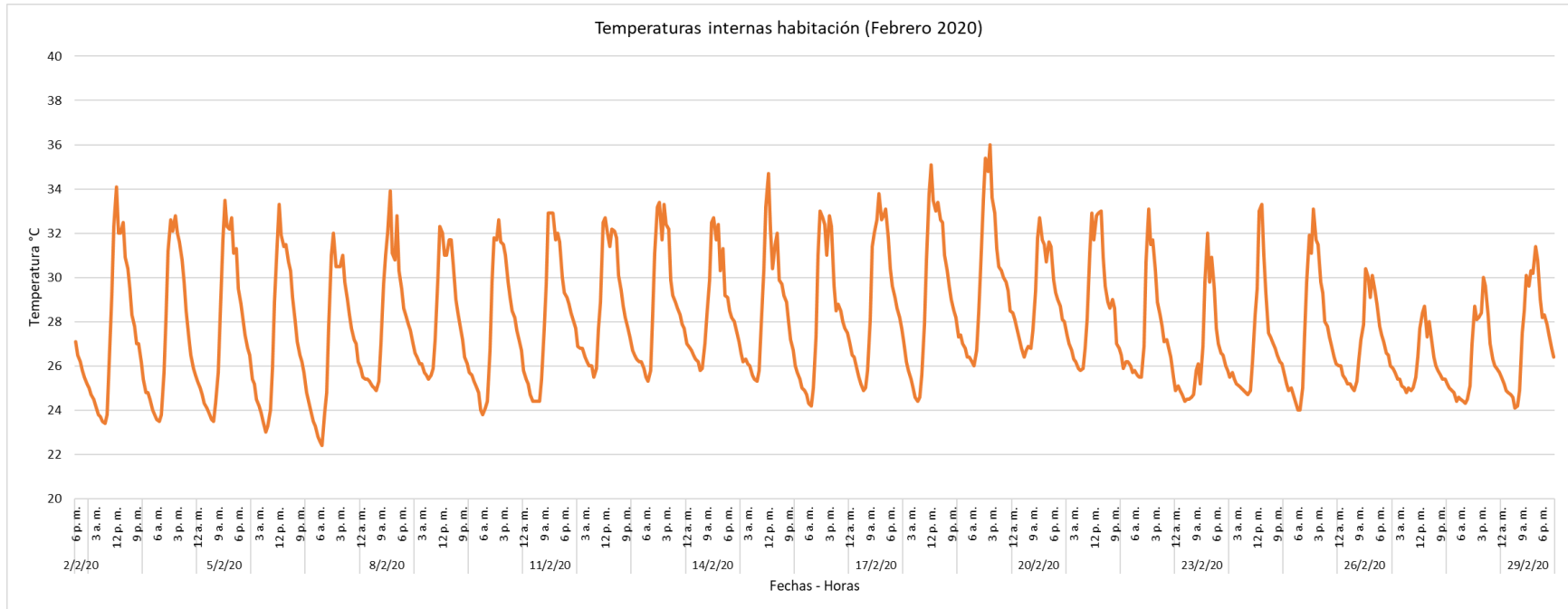
Anexo 12 - Caracterización cubierta existente

| CARACTERIZACIÓN CUBIERTA EXISTENTE | | | |
|--------------------------------------|--|--|---|
| TEJA DE BARRO | | | |
| TIPO | DESCRIPCIÓN | IMAGEN | CONDUCTIVIDAD TÉRMICA |
| TEJA PLANA DE GRES (TEJA DE ARCILLA) | <p>Teja elaborada con arcilla cocida o conocida como teja de gres. Dimensiones promedio de 30cm x 20 cm x 1 cm descontando el traslazo longitudinal de 5cm y transversal de 2,5cm. Por unidad de área son aproximadamente 15 tejas, es decir, que el peso que aporta a la estructura sería de 28 kg/m² hasta 38kg/m². Esto depende de las dimensiones, peso y traslazos con la que se monte la estructura.</p> |  | <p>$K = 0,824 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ (Guerra & Jaramillo, 2015)</p> |
| MANTO IMPERMEABLE | | | |
| TIPO | DESCRIPCIÓN | IMAGEN | CONDUCTIVIDAD TÉRMICA |
| MANTO ASFÁLTICO | <p>Es usada como para protección de las áreas de las diferentes condiciones climáticas. También es un material impermeabilizante producido por la unión de una capa polimérica bituminosa y dos caras sobre una base de poliéster. Este material tiene buena resistencia a altas fluctuaciones de temperatura y altas cargas mecánicas lo que proporciona una impermeabilización a largo plazo.</p> <p>Espesor 3.2mm</p> |  | <p>$K = 0,692 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ (Martínez, 2016)</p> |
| MACHIMBRE DE MADERA | | | |

| TIPO | DESCRIPCIÓN | IMAGEN | CONDUCTIVIDAD TÉRMICA |
|---------------------|--|--|--------------------------------------|
| MADERA DE CIPRES | El machimbre que se encuentra por debajo del manto asfáltico es de tipo ciprés o pino debido a que es un material resistente y flexible por su facilidad de trabajo. Además, es madera ligera - semipesada con nódulos visibles tal como se aprecia en la imagen anexa de la estructura en servicio. |  | K= 0,692 W/(m*K) (Martínez, 2016) |

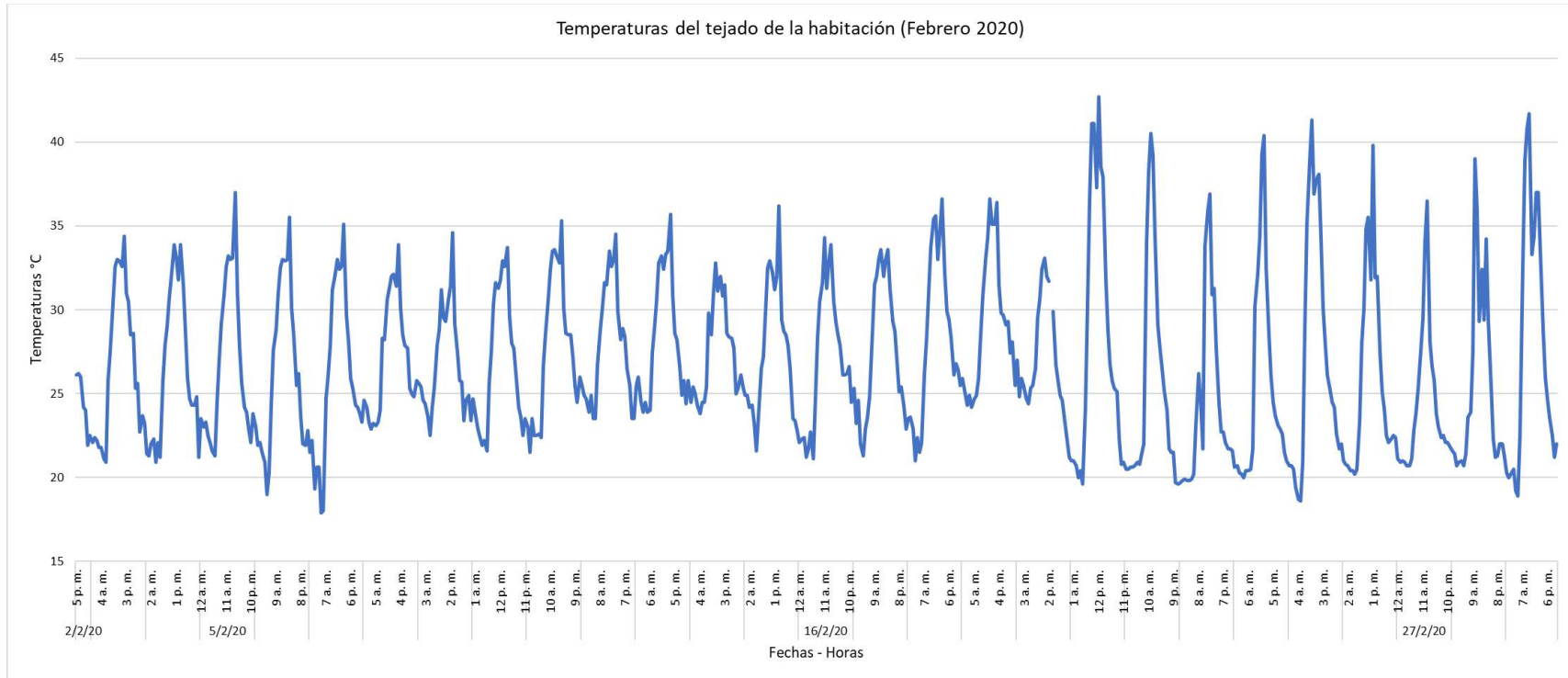
Fuente: Propia

Anexo 13 - Temperaturas internas habitación (febrero 2020)



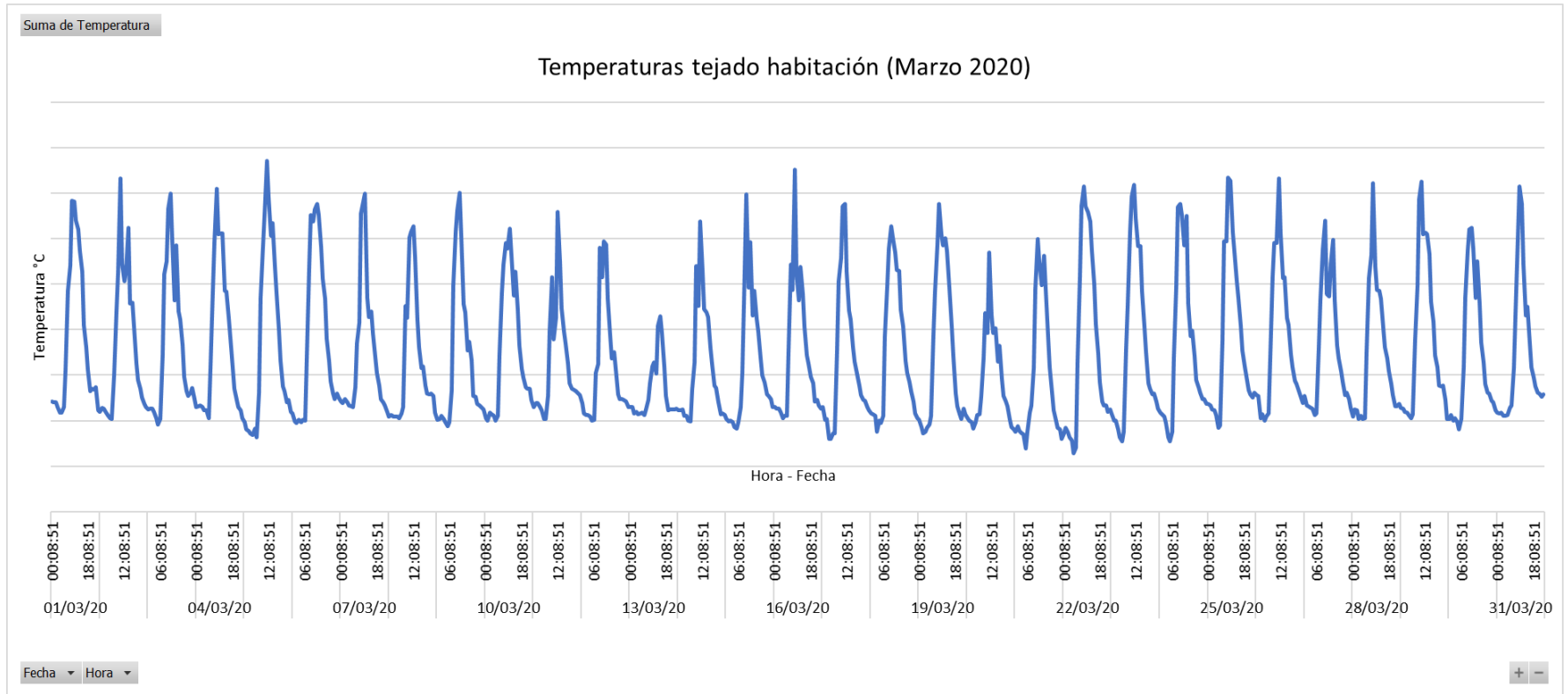
Fuente: Autores

Anexo 14 - Temperatura del tejado de la habitación (febrero 2020)



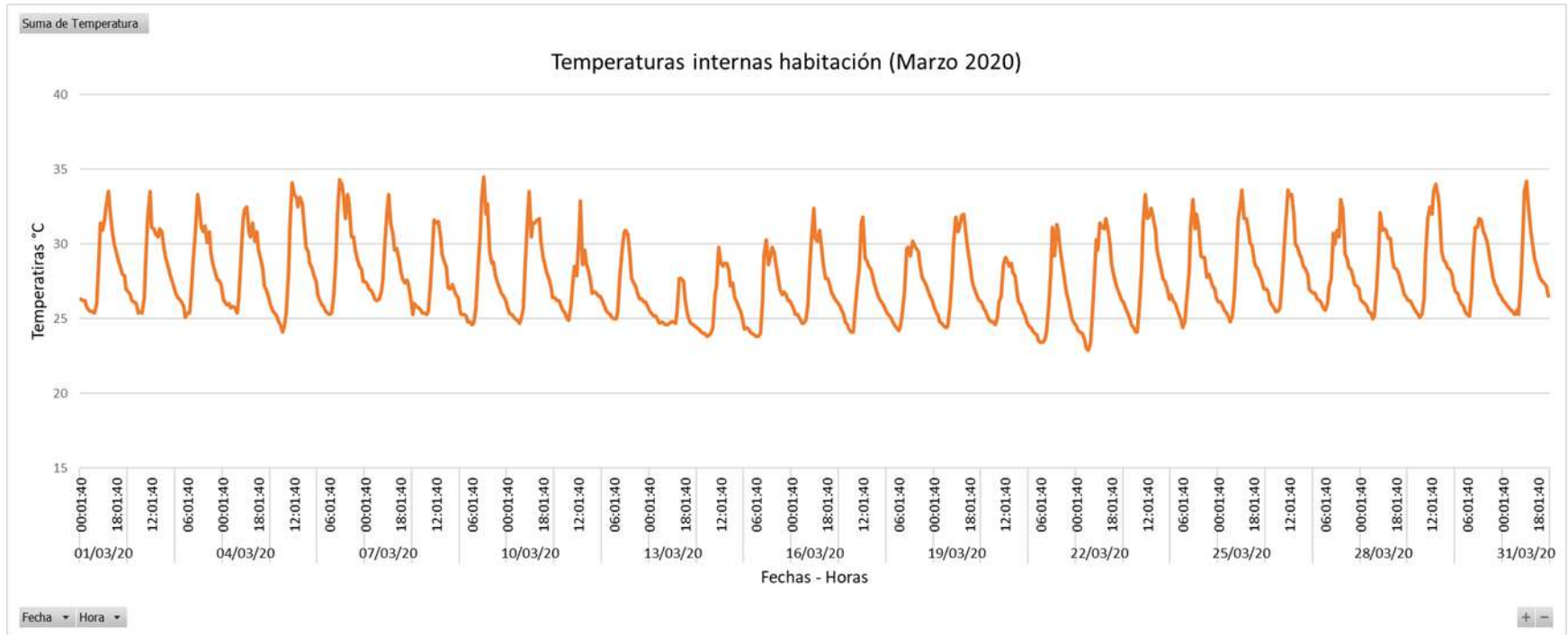
Fuente: Autores

Anexo 15 – Temperaturas tejado habitación mes de marzo 2020



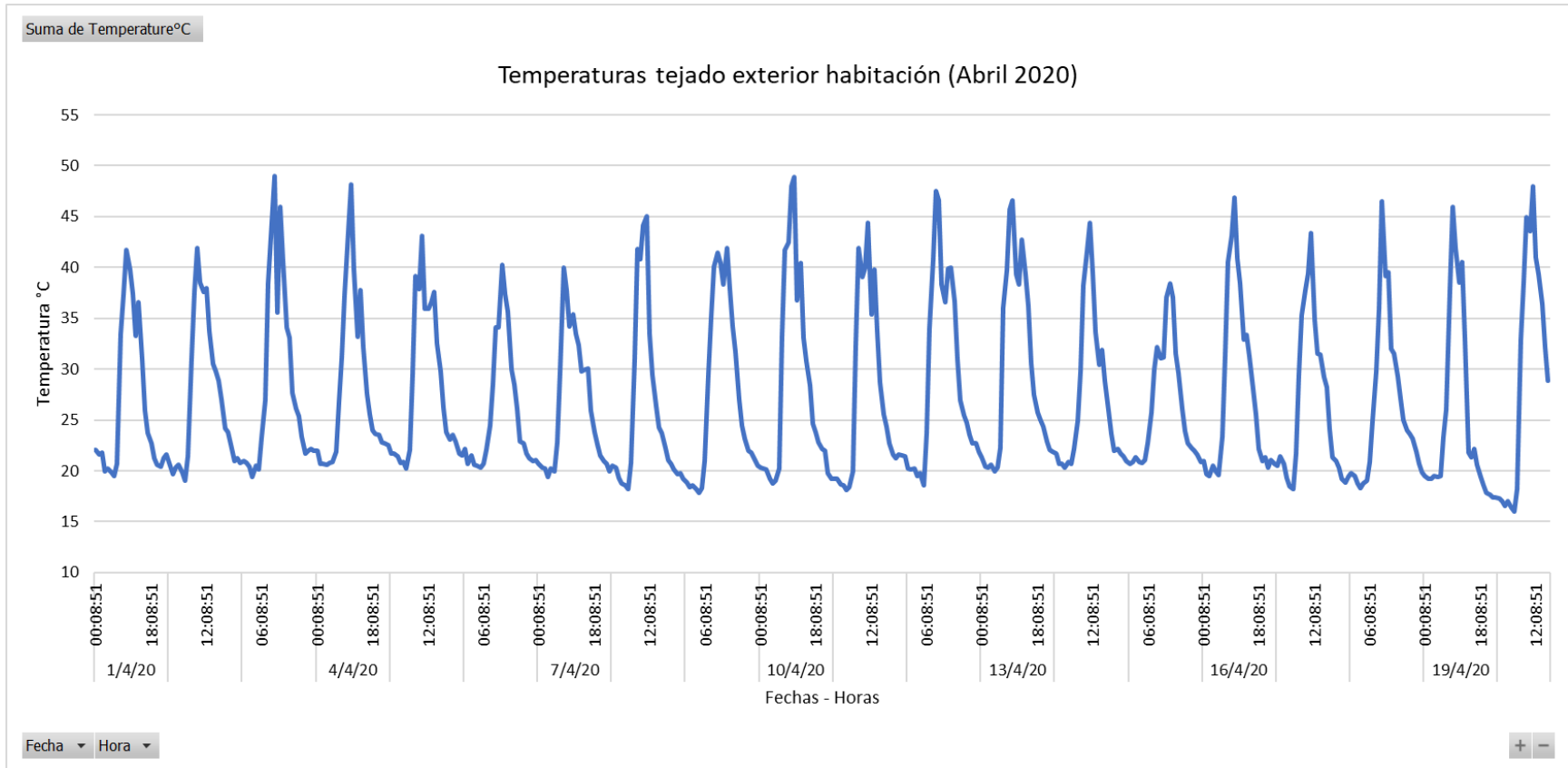
Fuente: Propia

Anexo 16 – Temperaturas internas habitación mes de marzo 2020



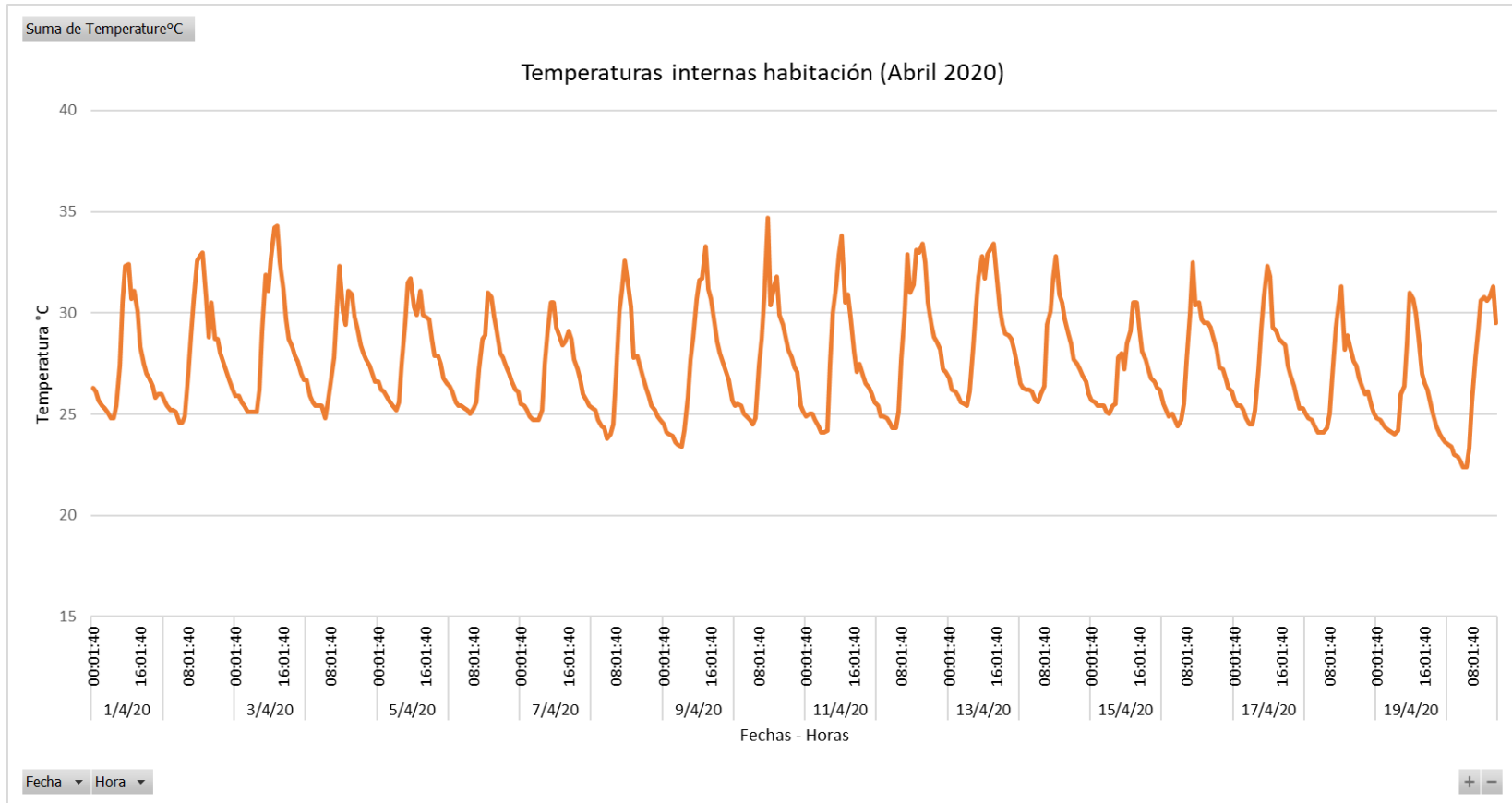
Fuente: Propia

Anexo 17 – Temperaturas tejado habitación mes de abril 2020



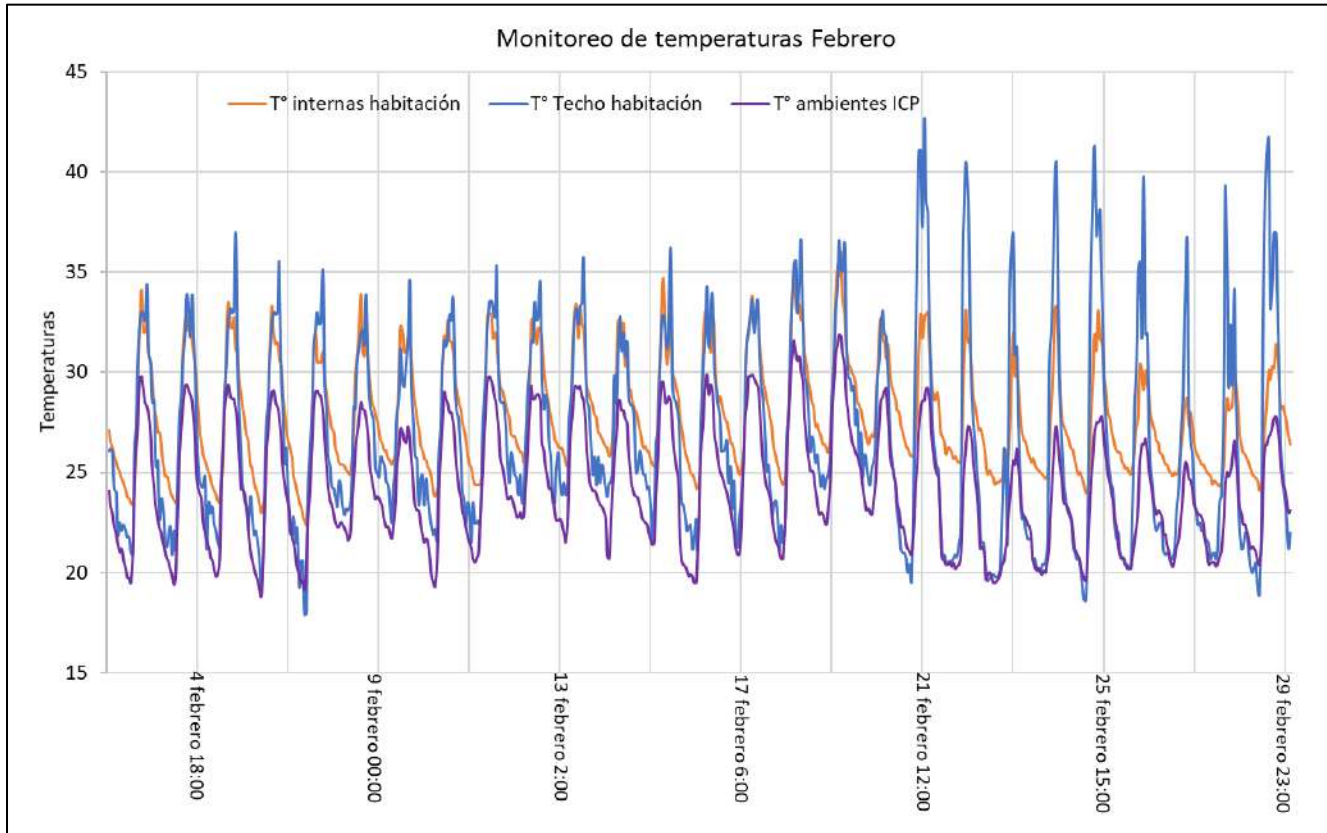
Fuente: Propia

Anexo 18 – Temperaturas internas habitación mes de abril 2020



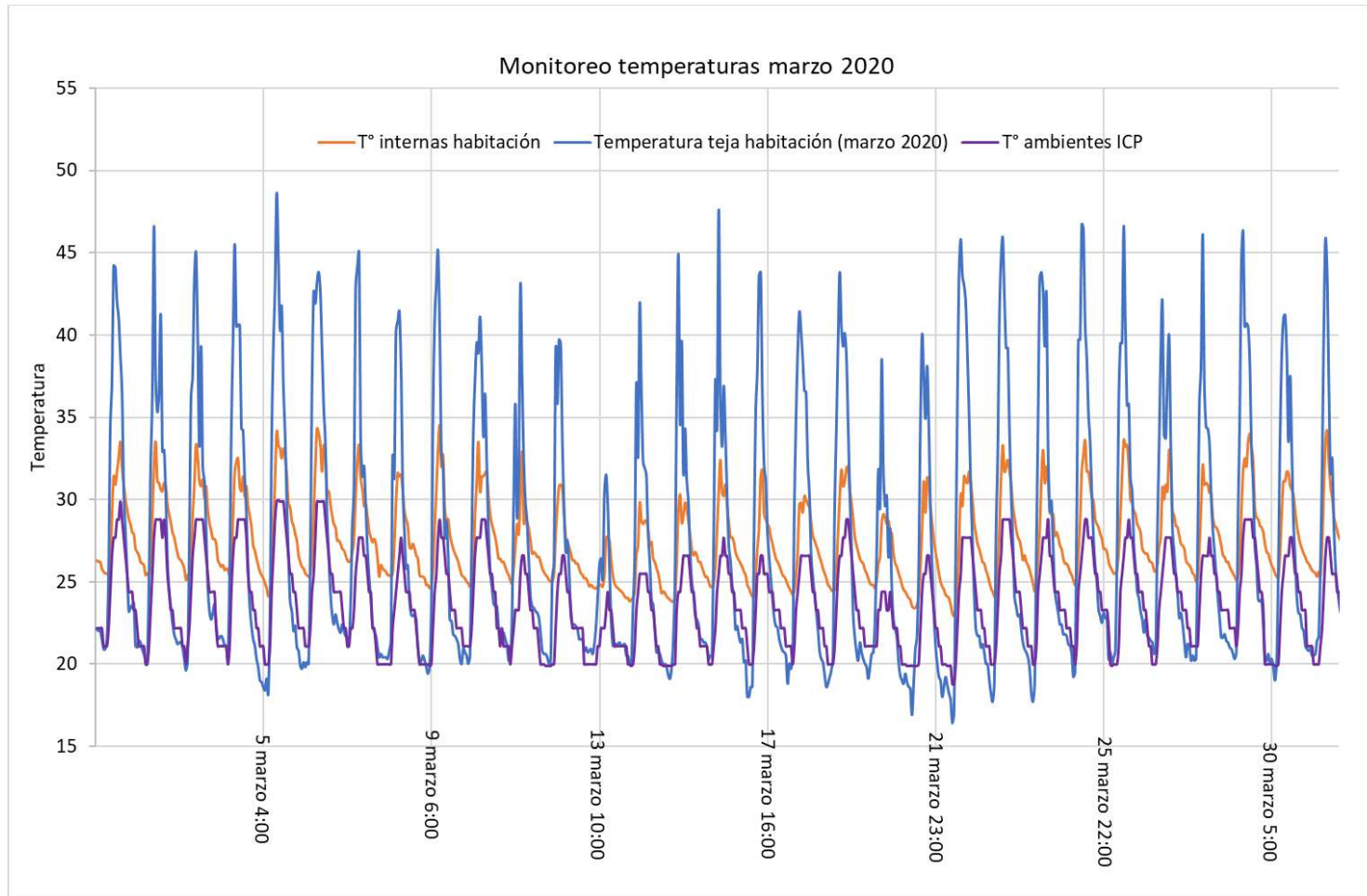
Fuente: Propia

Anexo 19 – Temperaturas ambientes ICP, teja y habitación mes de febrero 2020



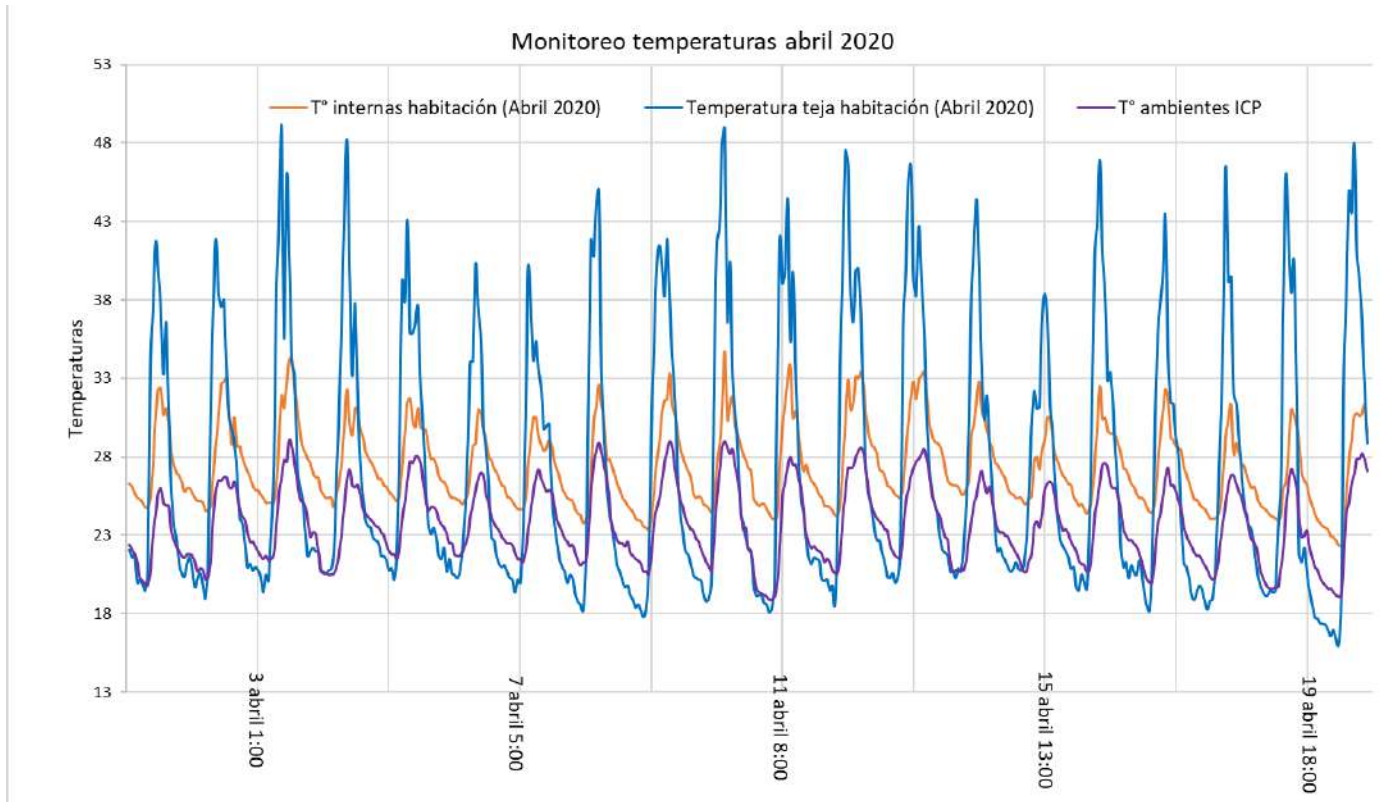
Fuente: Propia

Anexo 20 - Temperaturas ambientes ICP, teja y habitación mes de marzo 2020



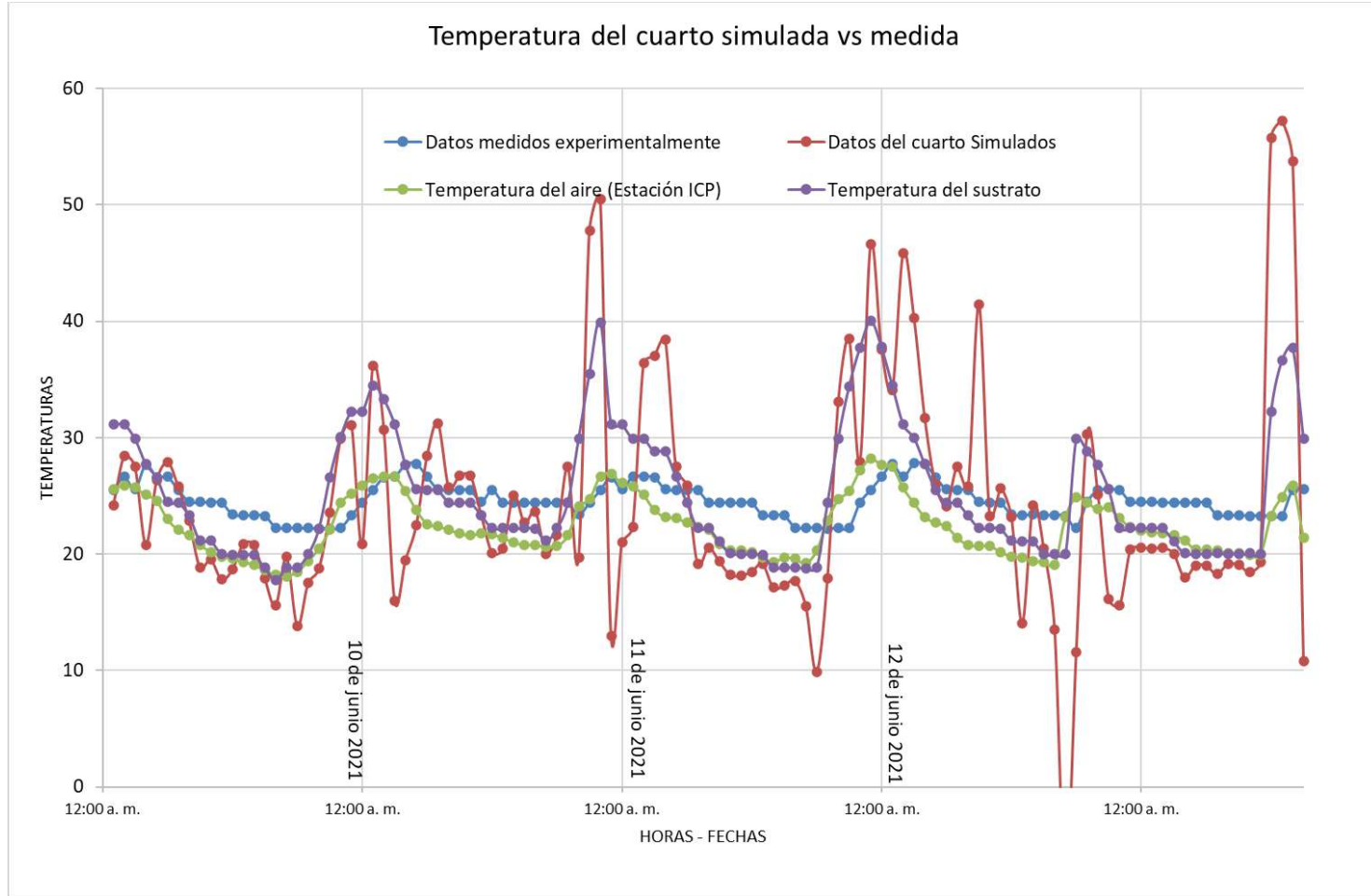
Fuente: Propia

Anexo 21 - Temperaturas ambientes ICP, teja y habitación mes de abril 2020



Fuente: Propia

Anexo 22 – Resultados simulación final temperatura del cuarto



Fuente: Autores

Anexo 23 – Cronología actividades y proceso de refuerzo estructural empleados para la adaptación de la estructura interna de la habitación



Ilustración 71 – Demarcación para demolición de la pared

Fuente: Propia



Ilustración 72 – Proceso de demolición para conexión entre perfil y viga

Fuente: Propia



Ilustración 73 – Instalación y fundida de viga adicional

Fuente: Propia



Ilustración 74 – Pintura y soldadura de perfiles

Fuente: Propia



Ilustración 75 – Instalación y conexión de perfil de refuerzo

Fuente: Propia



Ilustración 76 – Soldado y fundido de perfiles

Fuente: Propia

Anexo 24 – Código adaptador de los autores (Tabares Velasco, 2009)

CÓDIGO ADAPTADOR DEL AUTOR TABARES-VELASCO A LAS CONDICIONES

DEL PRESENTE PROYECTO

```

rm(list = ls())

getwd()

setwd("C:/Users/jose2/OneDrive/Desktop/luis/Archivos marzo 2021")

#####Entradas modelo acorde con Dimitri y Tabares

install.packages("readxl")

library(readxl)

file.choose()

ruta_excel <- "C:\\Users\\jose2\\OneDrive\\Desktop\\luis\\Archivos marzo
2021\\DATOS PARA ANÁLISIS CON DELTAS (1).xlsx"

excel_sheets(ruta_excel)

Datos_estacion <- read_excel (ruta_excel,

                               sheet = 'Datos para R reales',

                               range = 'A1:J112')

install.packages("openxlsx")

#####Entradas Radiación#####

#Radiación Onda Corta - Solar (Etación meteorológica UPB) [ W/m^2]

Is<- c(Datos_estacion$`Radiación Solar Is (W/m2)`)

#VWC aproximado del sustrato ( medido con equipo arduino)

```

```

Mg_medido <- c((Datos_estacion$`Humedad del suelo VWC (%)`)/100)
y <- length(Mg_medido)

#VWC promedio para la cubierta verde en funcionamiento
VWC_av <- mean (Mg_medido)
VWC_av

#Albedo del sustrato [%] (Schwarz C., 2015 -> 0.18, 0.155 y 0.13) y
#(Tabares & Srebric, 2011)

ag <- c()
for (i in 1:y) {
  if (Mg_medido[i] >= 0.5 ) {
    ag[i] <- 0.1
  }
  else if (Mg_medido[i] <= 0.22){
    ag[i] <- 0.35
  }
  else (ag[i] <- 0.155)
}

print(ag)

#Albedo del follaje [%] (Schwarz C., 2015 & Frankenstein & Koenig, 2004)
af <- c(0.18)

#Emisividad del sustrato, valor entre 0.92 - 0.97 (Frankenstein & Koenig, 2004)
eg <- c(0.95)

#F(Tg) (Frankenstein & Koenig, 2004)
Ftg <- c(1-(0.0016*((298-Tg)^2)))
Ftg

#Emisividad del follaje (Frankenstein & Koenig, 2004)
ef <- c(0.90 + (Ftg * (0.96-0.90)))

#Constrante de Stefan Boltzmann (Cengel & Boles, 2011) [W/(m^2 * K^4)]
S <- c(5.6704* 10^-8)

#Indice de área de tallo (Tabla Dickinson et al., 1986) ( Puede estar entre 0.5
y 2)
SAI <- c(0.5)

# LAI calculado experimentalmente para el tipo de vegetación
LAI <- c(2.77)

# Sf real
Sf <- c(0.57)

#Espesor del sustrato- Perlita, hummus de lombriz y tierra negra ( Autores,
2021) [m]
L_g<- c(0.1)

```

```

####Entradas          Convección          (          Calor
Sensible)#####

#Coeficiente de transferencia de calor sensible en ausencia de viento para
reflejar la convección natural debido al gradiente de temperatura [W/m^2 * K]
e0 <- c(2)

#Calor específico del aire a presión constante (Cengel & Boles, 2011) [J/Kg *
K]
cp_a <- c(1005.6)

#Altura de las plantas [m] ( Autores, 2021)
zf <- c(0.1)

#Constante de Von Karman
kv <- c(0.4)

#Altura del sensor de temperatura [m]
za <- c(2)

#Velocidad del viento de la estación meteorológica - min 2m/s [m/s] toca
condicionar este valor mínimo
W <- c(Datos_estacion$`Velocidad del viento W (m/s)` )
w1 <- length(W)

W_real <- c()
for (i in 1:w1) {
  if (W[i] < 2 ) {
    W_real[i] <- 2
  }
  else if (W_real[i] <- W[i]){
  }
}
print(W_real)

#Número de Schmidt
rch <- c(0.63)

# Longitud de rugosidad del sustrato [m]
zo_g <-c(0.001)

#Fuerza de la Gravedad (Cengel & Boles, 2011) [m/s^2]
g <- c(9.80665)

#Presión atmosférica estándar (Cengel & Boles, 2011 = 101325, pero se usaron
datos de la Estación Metereológica UPB) [kPa]
Patm <- c(Datos_estacion$`Presión Atmosférica (KPa)`/1000)

#Masa molar del aire (Cengel & Boles, 2011) [Kg / kmol]
M <- c(28.97)

#Constante universal de los gases ideales (Cengel & Boles, 2011) [(kPa * m^3)
/ (kmol * K)]
R <- c(8.31447)

```

```

####Entradas          Convección          (          Calor
Latente)#####

#Coeficientes para cálculo de presión de vapor (Frankenstein & Koenig, 2004)
a_w <- c(17.269)
a_i <- c(21.8745)
b_w <- c(35.86)
b_i <- c(7.66)

#Humedad relativa (Frankenstein & Koenig, 2004)
RH <- c(1.0)

#Precipitación zona de interés [mm] (Estación Meteorológica UPB)
P <- c(Datos_estacion$`Precipitación P (mm)` )
ñ <- length(P)

#Factor de humedad del suelo (Usando datos del Equipo arduino)
Mg <- c()
for (i in 1:ñ) {
  if (P[i] > 0 ) {
    Mg[i] <- 1
  } else if (P[i] == 0) {
    Mg[i] <- Mg_medido[i]
  }
}
print(Mg)

#Presión de vapor de saturación a 0 °C (Frankenstein & Koenig, 2004) [Pa]
ea_0 <- c(610.78)

#Resistencia estomatal mínima (Jones, 1992 y Tabares & Srebric 2011) [s/m]
rs_min <- c(700)

#Contenido de agua volumétrico promedio en la zona de raíz (Vera et. al, 2017)
MC_root<- c(0.3)

#Contenido de agua volumétrico mínimo o residual (Vera et. al, 2017)
MC_min <- c(0.001)

#Contenido de agua volumétrico máximo (Vera et. al, 2017), aunque Sailor propone
un máximo de 0.6
MC_max <- c(0.50)

#Número de Prandtl para flujo turbulento
rce <- c(0.71)

```

```
#####Calculos para completar entradas del balance de energía y
masa#####

#####Cálculos para complementar entradas Convección (Calor
sensible)#####

#Temperatura en la sección aire-follaje [K] (No se usará ya que se analizaron
los dos escenarios (Sf = 1 y Sf = 0), y luego la combinación de ambos para ver
la influencia del Sf)

Taf <- c(((1 - Sf) * Ta) + (Sf * ( (0.3 * Ta) + (0.6 * Tf) + (0.1 * Tg))))
Taf

#Densidad del aire cerca al follaje y al sustrato calculado con la Ley de los
Gases Ideales [Kg/m^3]
d_af <- c((Patm * M) / (R * Tf))
d_af

d_ag <- c((Patm * M) / (R * Tg))
d_ag

#Longitud de rugosidad de la planta [m] (Frankenstein & Koenig, 2004)
Zo_f <- c(0.131 * (Zf^0.997))
d <- length(Zo_f)
Zo_freal <- c()
for (i in 1:d) {
  if (Zo_f[i] < 0.02 ) {
    Zo_freal[i] <- 0.02
  }
  else if (Zo_freal[i] <- Zo_f[i]){
  }
}
print(Zo_freal)

#Altura de desplazamiento cero [m]
Zd <-c( 0.701 * (Zf^0.975))
Zd

#Coeficiente de transferencia a granel en la superficie superior del follaje
Chn_f <- c((kv/(log((Za-Zd)/Zo_freal)))^2)
Chn_f

#Velocidad del viento dentro del follaje - Se vuelve W en caso de ausencia de
vegetación [m/s]
Waf <- c((0.83 * Sf * sqrt(Chn_f) * W_real) + ((1 - Sf) * W_real))
Waf

#Velocidad del viento dentro del follaje - considerando el excenario 1 donde Sf
= 1 [m/s]
Waf1 <- c((0.83 * sqrt(Chn_f) * W_real))
Waf1

#Velocidad del viento dentro del follaje - considerando el excenario 1 donde Sf
= 0 [m/s]
Waf2 <- c( W_real)
Waf2
```

```

#Coeficiente de transferencia a granel para el flujo de aire dentro del follaje
[s/m] (Sf = 1)
Cf <- c(0.01 * (1+(0.3/Waf1)))
Cf

#Coeficiente de transferencia a granel cerca de la superficie del sustrato
Chn_g <- c(((kv/(log((Za-Zd)/Zo_g)))^2)/ rch)
Chn_g

#Número de Richardson
Rib <- c((2 * g * Za * ( Taf - Tg))/(Waf1^2*(Taf + Tg)))
Rib
m <- length(Rib)

#Valor Gama para determinar el coeficiente de transferencia del flujo de calor
sensible al granel para el medio de crecimiento (sustrato)
Ga <- c()
for (j in 1:m) {
  if (Rib[j] < 0) {
    Ga[j] <- (1-((9.4 * Rib[j])/sqrt(1 + 7.4 * Chn_g * 9.4 * sqrt(Za/Zo_g) *
abs(Rib[j])) )))
  } else if (Rib[j] == 0) {
    Ga[j] = 1
  }else {
    Ga[j] <- (1/(1 + (4.7 * Rib[j]))^2)
  }
}
print(Ga)

#Factor de corrección para la estabilidad del intercambio de calor sensible
Ch_g <- c(Ga * (((1 - Sf) * Chn_g) + ( Sf * Chn_f)))
Ch_g

#Factor de corrección para la estabilidad del intercambio de calor sensible
suelo lleno de vegetación, Sf = 1
Ch_g1 <- c(Ga * ( Chn_f))
Ch_g1

#Factor de corrección para la estabilidad del intercambio de calor sensible
suelo sin vegetación, Sf = 0
Ch_g2 <- c(Ga * ((Chn_g)))
Ch_g2

#Coeficiente del flujo de transferencia de calor sensible, follaje [W/m^2 * K]
( la eo puede sobrar por la corrección de tabares " An investigation of sensible
heat fluxes at a green roof in a laboratory setup", aunque Konkov(2018) la
incluye como un ajuste)
hf <- c((1.5 * LAI * d_af * cp_a * Cf * Waf))
hf

#Coeficiente del flujo de transferencia de calor sensible, follaje [W/m^2 * K]
( Para Sf = 1)
hf1 <- c((1.5 * LAI * d_af * cp_a * Cf * Waf1))
hf1

```

```

#Coeficiente del flujo de transferencia de calor sensible, follaje [W/m^2 * K]
McAdam's Method
hf_mcadams <- 5.9 + ((4.1 * W_real)*((511+294)/(511+ Ta)))
hf_mcadams

#Coeficiente del flujo de transferencia de calor sensible, sustrato lleno de
vegetación[W/m^2 * K]
hg <- c((d_ag * cp_a * Ch_g * Waf))
hg

#Coeficiente del flujo de transferencia de calor sensible, sustrato lleno de
vegetación[W/m^2 * K] (Sf = 1)
hg1 <- c((d_ag * cp_a * Ch_g1 * Waf1))
hg1

#Coeficiente del flujo de transferencia de calor sensible, sustrato sin
vegetación [W/m^2 * K] (Sf = 0)
hg2 <- c((d_ag * cp_a * Ch_g2 * Waf2))
hg2

#Flujo de calor sensible follaje [W/m^2] (Ayata et. al, 2011)
Hf <- c(hf * (Tf-Taf))
Hf

#McAdam's Method
Hff <- 2 * hf_mcadams * (Tf -Ta)
Hff

#Flujo de calor sensible follaje [W/m^2] (Ayata et. al, 2011) (Para Sf=1)
Hf_1 <- c(hf1 * (Tf-Ta))
Hf_1

#Flujo de calor sensible sustrato [W/m^2] ((Ayata et. al, 2011)) ( se considera
Taf pues no se asume la ausencia de vegetación)
Hg <- c(hg * (Tg -Taf))
Hg

#Flujo de calor sensible sustrato [W/m^2] ((Ayata et. al, 2011)) ( no se
considera Taf pues se asume la ausencia de vegetación)
Hg_1 <- c(hg1 * (Tg -Ta))
Hg_1

#Flujo de calor sensible sustrato [W/m^2] ((Ayata et. al, 2011)) ( no se
considera Taf pues se asume la ausencia de vegetación)
Hg_2 <- c(hg2 * (Tg -Ta))
Hg_2

#####Calor convectivo según Tabares & Srebric (2011) #Se tuvo en cuenta
valores teóricos para aire seco de Kreith (2011 A-26)

#Conductividad del medio de crecimiento
k_por <- ((0.85 * 0.5) + ((1 - 0.85)* 0.5))

#Calor específico del agua
cp_w <- 4179

```

```

#Calor específico teniendo en cuenta como valor máximo el calor específico de
la materia orgánica = 2470 y mínimo el calor específico de la perlita = 837 ;
ambos presentes ene l caso de estudio.
cp_substrate <- 1653.5

#Difusividad térmica
a_por <- (k_por/(1 * cp_substrate))

#####
#Método 1 para escoger número de Nusselt:

#Coeficiente de dilatación térmica
beta <- 3.5 * 10 ^-3
#Viscosidad cinemática
v_cin <- 14.08 * 10^-6
#Número de Reynolds
Re <- ((W_real * L_g)/ (v_cin))
Re
#Número de Grashof
Gr <- ((g * beta * (Tg-Ta) * (L_g^3))/((v_cin)^2))
Gr
#Parametro para flujo turbulento
(0.068 * (Re ^2.2)) - Gr
#Como lo cumple, se aplica la siguiente fórmula para el número de Nusselt
Nu_tab <- (3 + (1.25 * (0.025 * (Re ^0.8))))

#####
#Método 2 ESCOGIDO -> (Propio de tabares para el escenario Sf = 1) :
#Número de Péclet
Pe <- c((0.3 * W_real * L_g)/ a_por)

#Número de Nusselt de acuerdo a la relación con el número de Peclet
Nu <- c(1.128 * (Pe^0.5))

#####
#Método 3:
#Alterno para definit número de Nusselt
Nu_1 <- c((hf1 * L_g) / k_por)

#FLujo de calor convectivo
Q_convection_plants <- Hf_1
Q_convection_plants

Pe <- c((Nu / 1.128)^2)

h_por <- c((k_por * 1.128 * ((Pe^0.5)))/L_g)

h_sub <- ((h_por * hf1)/(h_por + hf1))
h_sub

Q_convection_substrate_cov <- c(h_sub * (Tg - Ta))
Q_convection_substrate_cov

```

```

#####Cálculos para complementar entradas Convección (Calor
latente)#####

#Presión de vapor aire (Frankenstein & Koenig, 2004) [Pa]
e_a1 <- c(ea_0 * RH * exp((a_w * (Ta - 273.16)) / (Ta - b_w)))
e_a <- e_a1 / 1000

#Presión de vapor follaje (Frankenstein & Koenig, 2004) [Pa]
e_f1 <- c(ea_0 * RH * exp((a_w * (Tf - 273.16)) / (Tf - b_w)))
e_f <- e_f1 / 1000

#Presión de vapor sustrato (Frankenstein & Koenig, 2004) [Pa]
e_g1 <- c(ea_0 * RH * exp((a_w * (Tg - 273.16)) / (Tg - b_w)))
e_g <- e_g1/1000

####Resistencia Stomatal (Frankenstein & Koenig, 2004 y Konkov,
2018)#####

#Resistencia a la difusión de vapor atmosférica y de las plantas [s/m]
ra<- c(1/(Cf * Waf))
ra

#Función de la disponibilidad de radiación solar en la raíz de la planta
f_suncalculado <- c(((0.004 * Is) + 0.005) / (0.81 * ((0.004 * Is) + 1)))

l <- length(f_suncalculado)

f_sun <- c()
for (k in 1:l) {
  if (f_suncalculado[k] < 1 ) {
    f_sun[k] <- f_suncalculado[k]
  } else if (f_suncalculado[k] == 1) {
    f_sun[k] <- 1
  }else {
    f_sun[k] <- 1
  }
}
print(f_sun)

#Función de la disponibilidad de humedad en la raíz de la planta
f_mc <- c((MC_root - MC_min) / (MC_max - MC_min))

#Resistencia estomatal [s/m]
rs_calculado<- c((rs_min/LAI) * 1/(f_sun) * 1/(f_mc))
r1 <- length(rs_calculado)

rs1 <- c()
for (i in 1:r1) {
  if (rs_calculado[i] > 1125 ) {
    rs1[i] <- 1125
  }
  else if (rs1[i] <- rs_calculado[i]){
  }
}
print(rs1)

```

```

#Relación de humedad en la superficie del follaje
rt <-c( ra/(ra + rs1))
rt

####Resistencia Stomatal (TESIS TABARES & Tabares & Srebric,
2011)#####

####revisar tabares, a lo mejor no va 1/ F
F_SOLAR <- c(1+ exp((-0.034)*(Is - 3.5)))

F_VPD <- c(1/(1 - (0.41 * log((abs((e_f)-(e_a))))))) # Error por Ln de un
negativo, esperar a medir con equipo arduino

F_TEMP <- c(1/(1 - (0.0016 * (35 - (Tf - 273.15))^2))) ### Esta ecuación
cambió con la validación OJOO## (Tabares & Srebric, 2011)

#(1) 0.55 for fully saturated (Denardo 2003), (2) 0.34
#for field capacity (Denardo 2003), and (3) 0.02 for wilting point (Berghage
R., pers. comm.,September 9, 2008).

F_VWC <- c()
q <- length(Mg_medido)
for (i in 1:q) {
  if (Mg_medido[i] > (0.7 * 0.34)) {
    F_VWC[i] <- 1
  } else if (Mg_medido[i] < 0.02) {
    F_VWC[i] <- 1000
  }else {
    F_VWC[i] <- ((0.7 * 0.34) - 0.02) / (Mg_medido[i] - 0.02)
  }
}
print(F_VWC)

rs <- (rs_min / LAI) * (F_SOLAR) * (F_VPD) * (F_TEMP) * (F_VWC)
rs

#####Entradas Conductividad#####

#Conductividad del sustrato - Perlita, hummus de lombríz y tierra negra (Vera
et. al, 2017) [W/m * K]
k_g1 <-rep(0.208, 111)

#Conductividad del sustrato - Suelo constituido principalmente por pizarra
expandida(tipo de lutita) (Tabares & Srebric, 2011) [W/m * K]
k_g <- (0.2)+((1.4) *(Mg_medido))

#Conductividad Capa filtrante - Geotextil no tejido 1600 (Martínez, 2016) [W/
(m * K)]
k_filt <- rep(0.14, 111)

#Conductividad Capa drenante - (Martínez,2016) [W/ (m * k)]
k_drain <- rep(0.285, 111)

#Conductividad Capa anti-raíz - Manto Poliéster 40 Anti Raíz (Martínez, 2016)
[W/ (m * K)]
k_anti <- rep (0.275, 111)

```

```

#Conductividad Capa impermeabilizante - Manto asfáltico (Martínez, 2016) [W/ (m
* k)]
k_imp <- rep(0.692, 111)

#Conductividad Cubierta actual - Machimbre Pino cipres (Norma Chilena Oficial
NCh. 853, Of. 93) [W/ (m * k)]
k_roof <- rep (0.104, 111)

#Espesor Capa sustrato
L_g <- rep(0.1,111)

#Espesor Capa filtrante - Geotextil no tejido 1600 [m]
L_filt <-rep (0.001, 111)

#Espesor Capa drenante [m]
L_drain <- rep (0.008, 111)

#Espesor Capa anti-raíz - Manto Poliéster 40 Anti Raíz[m]
L_anti <- rep (0.0012, 111)

#Espesor Capa impermeabilizante [m]
L_imp <- rep (0.0032, 111)

#Espesor Cubierta actual - Machimbre Pino cipres [m]
L_roof <- rep (0.007, 111)

#Temperatura en la superficie del sustrato (Termocupla con Arduino) [K]
temporalmente tiene valor de entrada Tg pero corresponde a la termocupla en la
superficie del sustrato
T_top <- (Tg)

#####Cálculos Conductividad#####

#Resistencia térmica total del sistema en serie [(m^2 * K) / W]
R_n1 <- c(L_g / k_g)
R_n1

R_n2 <- c(L_filt / k_filt)
R_n2

R_n3 <- c(L_drain / k_drain)
R_n3

R_n4 <- c(L_anti / k_anti)
R_n4

R_n5 <- c(L_imp / k_imp)
R_n5

R_n6 <- c(L_roof / k_roof)
R_n6

R_n <- (R_n1 + R_n2 + R_n3 + R_n4 + R_n5 + R_n6)

```

```

#Coeficiente total de transferencia de calor por conducción [W/ (m^2 * K)]
U <- c(1/(R_n))
U

#####MODELO          TABARES          CUBIERTA          VERDE          SIN
VEGETACIÓN#####

#####Entradas y ecuaciones balance de energía cubierta sin
vegetación#####

#####Radiación de onda corta absorbida por la cubierta sin vegetación
[W/m^2]
Rsh_abs <- c((1- ag) * Is)

#####Transferencia de calor convectivo entre la superficie del sustrato y
el aire circundante [W/m^2]
Q_s_s_1 <- (Hg_2)

#####Transferencia de calor por Evaporación en sustrato

#Entalpía de vaporización del agua [kJ/Kg]
i_fg <- 2256.5

#Constante psicométrica
pp <- c((cp_a * (Patm))/(0.622 * i_fg))

#Resistencia aerodinámica [s/m]
ra <- c(143)

#Resistencia del suelo a la evaporación
c1 <- (0)
c2<- (34.5)
c3 <- (-3.3)

#(1) 0.55 for fully saturated (Denardo 2003), (2) 0.34
#for field capacity (Denardo 2003), and (3) 0.02 for wilting point (Berghage
R., pers. comm.,September 9, 2008).

#Densidad del agua [Kg/m^3]
Gp <- c(997)

r_substrate <- c(c1 + (c2*(((VWC_av/MC_max)^ (c3))))))

Q_E <- c(((Gp * cp_a)/(pp * (r_substrate + ra))) * ((e_g - e_a)))
Q_E

#Flujo de calor por radiación de onda larga entre el suelo y el sustrato [W/m^2]

#Temperatura del cielo el cual también se puede tomar como Ta - 20°C
T_sky <- Ta

Q_IR <- c(eg * S * ( ((Tg)^4) - ((T_sky)^4) ))

#Balance sustrato sin vegetación (No se aplica, pero se considera la ecuación
para determinar la Temperatura_interna)

```

```
# Budget_bare_soil<- -Rsh_abs + Q_film + Q_cond, dónde Q_film involucra los
procesos: evaporación, transferencia de calor convectivo y por radiación (onda
corta y larga).
```

```
#####MODELO          TABARES          CUBIERTA          VERDE          CON
VEGETACIÓN#####
```

```
#####Entradas y ecuaciones balance follaje#####
```

```
#####Radiación de onda corta absorbida por el follaje [W/m2]
```

```
#Coeficiente de extinción
```

```
ks <- 1
```

```
#Transmitancia de onda corta del follaje
```

```
tr_solar<- (exp((-ks * LAI)))
```

```
#Transmitancia de la radiación termica, radiación que pasa a traves del follaje
(Onda larga)
```

```
tr_plants <- 0.0755
```

```
R_sh_abs_plants <- c((1 - af - tr_solar)*(1 + (tr_plants * ag))*(Is))
```

```
#####Transferencia de calor convectivo en el follaje
```

```
Q_convection_plants <- (Hf_1)
```

```
#####Transferencia de calor por transpiración de la planta
```

```
#Entalpía de vaporización del agua [kJ/Kg]
```

```
i_fg <- 2257
```

```
#Constante psicométrica
```

```
pp <- c((cp_a * Patm)/(0.622 * i_fg))
```

```
#Resistencia aerodinámica [s/m]
```

```
ra <- 143
```

```
Q_T <- c((LAI) * ((Gp * cp_a)/(pp * (rs + ra))) * ((e_f - e_a)))
```

```
Q_T
```

```
#####Radiación térmica entre el cielo, las plantas y el sustrato
```

```
Q_IR_PLANTS_SKY <- ((1 - tr_plants) * (ef) * (S) * ((Tf^4) - (T_sky^4)))
```

```
#####Transferencia de calor entre plantas y el ambiente circundante
```

```
Q_film_plants <- c( Q_IR_PLANTS_SKY + Q_convection_plants + Q_T)
```

```
#####Transferencia de calor entre la capa vegetal y la superficie del sustrato
por radiación de onda larga
```

```
Q_IR_S_P_dimitri <- c((((1- tr_solar) * ef * eg * S)/(ef + eg - (ef*eg)))
*((Tf)^4 - (Tg)^4))
```

```
Q_IR_S_P <- c((1- tr_solar)* (S * (((Tf)^4 - (Tg)^4))/((1/eg)+(1/ef)-(1))))
```

```
#####Balance Follaje#####
```

```
#Budget_f <- -R_sh_abs_plants + Q_film_plants + Q_IR_S_P
```

```

#####Entradas y ecuaciones balance sustrato#####
#####Radiación de onda corta absorbida por el sustrato
R_sh_abs_substrate <- c((tr_solar)*(1 - ag)* (Is))

#####Transferencia de calor convectivo entre la superficie del sustrato y
el aire circundante [W/m^2]
Q_s_s_2 <- Q_convection_substrate_cov

#####Transferencia de calor entre el sustrato y la capa vegetal por
radiación de onda larga
Q_IR_S_P

#####Radiación térmica entre el cielo, las plantas y el sustrato
Q_IR_SUBSTRATE_COV_SKY <- c((tr_plants) * (eg) * (S) * ((Tf^4) - (T_sky^4)))

#####Balance Sustrato#####
#Budget_g <- -R_sh_abs_substrate -Q_IR_S_P + Q_s_s_2 + Q_cond_vegetatedsoil +
Q_IR_SUBSTRATE_COV_SKY + Q_E

#Rapidez del flujo de calor por unidad de área es [W/m2]:
#Teniendo en cuenta la ecuación : Q_cond <- c(U * (T_top -
Temperatura_interna)), se continua con el despeje de la Temperatura interna
para ambos escenarios

#Temperatura interna (machimbre) de acuerdo al balance de energía para el
sustrato considerando vegetación

Temperatura_interna_covered <- c(((R_sh_abs_substrate + Q_IR_S_P -
Q_convection_substrate_cov - Q_IR_SUBSTRATE_COV_SKY + Q_E)/ (-U)) + (Tg))

Tg - Temperatura_interna_covered
sum(Tg - Temperatura_interna_covered)

#Temperatura interna (machimbre) de acuerdo al balance de energía para el
sustrato sin considerar vegetación con base en el balance
# Temperatura_interna_bare <- (((Rsh_abs - ((Q_s_s_1 + Q_IR + Q_E)) )/ (-U)) +
Tg)

Ti <- ((Rsh_abs - ((Q_s_s_1 + Q_IR - Q_E)) )/ (-U))
Ti
Ti_acc <- c()
q <- length(Ti)
for (i in 1:q) {
  if (Ti[i] < (-10) | Ti[i] > 10) {
    Ti_acc[i] <- 0
  } else {
    Ti_acc[i] <- Ti[i]
  }
}
print(Ti_acc)

Temperatura_interna_bare <- c(Ti_acc + Tg)

Temperatura_interna_bare - Temperatura_interna_covered
sum(Temperatura_interna_bare - Temperatura_interna_covered)

```

```

#Temperatura real del machimbre usando análisis en paralelo propuesto por
Tabares & Srebric (2011).

T_machimbre <- c((Sf * (Temperatura_interna_covered)) + ((1 - Sf)*
(Temperatura_interna_bare)))
T_machimbre

Tg - T_machimbre

sum(Tg - T_machimbre)

#Flujo a traves del techo sin veg
Q_cond_bare <- Rsh_abs - Hg + Q_E - Q_IR

#Flujo a traves del techo con veg
Q_cond_covered <- R_sh_abs_substrate + Q_IR_S_P - Q_s_s_2 -
Q_IR_SUBSTRATE_COV_SKY + Q_E

#Se considera la transferencia de calor a traves del techo como :
Q_sustrato <- c((Sf * (Q_cond_covered )) + ((1 - Sf)* (Q_cond_bare)))

#Finalmente Se asume el flujo de calor en estado estable a través de estructuras
compuestas para determinar la temperatura de la habitación del caso de estudio,
por lo que Q_cond = Q_conv:

# Para esto es necesario considerar como entrada el coeficiente de transferencia
de calor por convección libre o natural del aire [W/(m2 K)]
h_air <- 11.35

# Al considerar aire dentro de la habitación se plantea para el cálculo de la
Temperatura de la misma la ecuación de calor por convección : Q_conv = h_air
* (T_machimbre - T_cuarto)
# Por lo que al despejar la variable de interes se tiene :

T_cuarto <- c((Q_sustrato/-h_air) + T_machimbre )
T_cuarto

Ta - T_cuarto
Tg - T_cuarto

sum(Tg - T_cuarto)

Datos_simulados <- data.frame(T_cuarto)

setwd("C:/Users/jose2/OneDrive/Desktop/luis/Archivos marzo 2021")

library(openxlsx)

write.xlsx(Datos_simulados, "Datos_SIMULADOSTESIS_i.xlsx")

Datos_Tg <- data.frame(Tg)

setwd("C:/Users/jose2/OneDrive/Desktop/luis/Archivos marzo 2021")

library(openxlsx)

write.xlsx(Datos_Tg, "DatosTg.xlsx")

```

Anexo 25 – Modelo de transferencia de calor propuesto por (Konkov, 2018) y adaptado al escenario del proyecto en cuestión.

**CÓDIGO ADAPTADOR POR MEDIO DE DMITRII KONKOV Y ADAPTADO A LAS
CONDICIONES DEL PRESENTE PROYECTO**

```
rm(list = ls())
getwd()

setwd("C:/Users/jose2/OneDrive/Desktop/luis/Archivos marzo 2021")

#####Entradas modelo acorde con Dimitri y Tabares
install.packages("readxl")
library(readxl)
file.choose()
ruta_excel <- "C:\\Users\\jose2\\OneDrive\\Desktop\\luis\\Archivos marzo 2021\\DATOS PARA ANÁLISIS CON DELTAS (1).xlsx"
excel_sheets(ruta_excel)

Datos_estacion <- read_excel (ruta_excel,
                              sheet = 'Datos para R reales',
                              range = 'A1:J112')

install.packages("openxlsx")
#####Entradas Radiación#####

#Radiación Onda Corta - Solar (Estación meteorológica UPB) [ W/m^2]
Is<- c(Datos_estacion$`Radiación Solar Is (W/m2)`)

#VWC aproximado del sustrato ( medido con equipo arduino)
Mg_medido <- c((Datos_estacion$`Humedad del suelo VWC (%)`)/100)
y <- length(Mg_medido)

#VWC promedio para la cubierta verde en funcionamiento
VWC_av <- mean (Mg_medido)
VWC_av
```

```

#Albedo del sustrato [%] (Schwarz C., 2015 -> 0.18, 0.155 y 0.13) y
#(Tabares & Srebric, 2011)
ag <- c()
for (i in 1:y) {
  if (Mg_medido[i] >= 0.5 ) {
    ag[i] <- 0.1
  }
  else if (Mg_medido[i] <= 0.22){
    ag[i] <- 0.35
  }
  else (ag[i] <- 0.155)
}
print(ag)

#Albedo del follaje [%] (Schwarz C., 2015 & Frankenstein & Koenig, 2004)
af <- c(0.18)

#Emisividad del sustrato, valor entre 0.92 - 0.97 (Frankenstein & Koenig, 2004)
eg <- c(0.95)

#F(Tg) (Frankenstein & Koenig, 2004)
Ftg <- c(1-(0.0016*((298-Tg)^2)))
Ftg

#Emisividad del follaje (Frankenstein & Koenig, 2004)
ef <- c(0.90 + (Ftg * (0.96-0.90)))

#Constrante de Stefan Boltzmann (Cengel & Boles, 2011) [W/(m^2 * K^4)]
S <- c(5.6704* 10^-8)

#Indice de área de tallo (Tabla Dickinson et al., 1986) ( Puede estar entre 0.5
y 2)
SAI <- c(0.5)

# LAI calculado experimentalmente para el tipo de vegetación
LAI <- c(2.77)

# Sf real

```

```

Sf <- c(0.57)

#Espesor del sustrato- Perlita, hummus de lombriz y tierra negra ( Autores,
2021) [m]
L_g<- c(0.1)

####Entradas                Convección                (                Calor
Sensible)#####

#Coeficiente de transferencia de calor sensible en ausencia de viento para
reflejar la convección natural debido al gradiente de temperatura [W/m^2 * K]
e0 <- c(2)

#Calor específico del aire a presión constante (Cengel & Boles, 2011) [J/Kg *
K]
cp_a <- c(1005.6)
#Altura de las plantas [m] ( Autores, 2021)
Zf <- c(0.1)

#Constante de Von Karman
kv <- c(0.4)

#Altura del sensor de temperatura [m]
Za <- c(2)

#Velocidad del viento de la estación meteorológica - min 2m/s [m/s] toca
condicionar este valor mínimo

W <- c(Datos_estacion$`Velocidad del viento W (m/s)` )
w1 <- length(W)
W_real <- c()
for (i in 1:w1) {

  if (W[i] < 2 ) {
    W_real[i] <- 2
  }
  else if (W_real[i] <- W[i]){
  }
}
print(W_real)

```

```

#Número de Schmidt
rch <- c(0.63)

# Longitud de rugosidad del sustrato [m]
Zo_g <-c(0.001)

#Fuerza de la Gravedad (Cengel & Boles, 2011) [m/s^2]
g <- c(9.80665)

#Presión atmosférica estándar (Cengel & Boles, 2011 = 101325, pero se usaron
datos de la Estación Meteorológica UPB) [kPa]
Patm <- c(Datos_estacion$`Presión Atmosférica (KPa)`/1000)

#Masa molar del aire (Cengel & Boles, 2011) [Kg / kmol]
M <- c(28.97)

#Constante universal de los gases ideales (Cengel & Boles, 2011) [(kPa * m^3)
/ (kmol * K)]
R <- c(8.31447)

####Entradas                Convección                (                Calor
Latente)#####

#Coeficientes para cálculo de presión de vapor (Frankenstein & Koenig, 2004)
a_w <- c(17.269)
a_i <- c(21.8745)
b_w <- c(35.86)
b_i <- c(7.66)

#Humedad relativa (Frankenstein & Koenig, 2004)
RH <- c(1.0)

#Precipitación zona de interés [mm] (Estación Meteorológica UPB)
P <- c(Datos_estacion$`Precipitación P (mm)` )
ñ <- length(P)

```

```

#Factor de humedad del suelo (Usando datos del Equipo arduino)

Mg <- c()
for (i in 1:n) {
  if (P[i] > 0 ) {
    Mg[i] <- 1
  } else if (P[i] == 0) {
    Mg[i] <- Mg_medido[i]
  }
}
print(Mg)

#Presión de vapor de saturación a 0 °C (Frankenstein & Koenig, 2004) [Pa]
ea_0 <- c(610.78)

#Resistencia estomatal mínima (Jones, 1992 y Tabares & Srebric 2011) [s/m]
rs_min <- c(700)

#Contenido de agua volumétrico promedio en la zona de raíz (Vera et. al, 2017)
MC_root<- c(0.3)

#Contenido de agua volumétrico mínimo o residual (Vera et. al, 2017)
MC_min <- c(0.001)

#Contenido de agua volumétrico máximo (Vera et. al, 2017), aunque Sailor propone
un máximo de 0.6
MC_max <- c(0.50)

#Número de Prandtl para flujo turbulento
rce <- c(0.71)

#####Calculos para completar entradas del balance de energía y
masa#####

#####Cálculos para complementar entradas Convección (Calor
sensible)#####

```

```

#Temperatura en la sección aire-follaje [K] (No se usará ya que se analizaron
los dos escenarios (Sf = 1 y Sf = 0), y luego la combinación de ambos para ver
la influencia del Sf)

Taf <- c(((1 - Sf) * Ta) + (Sf * ( (0.3 * Ta) + (0.6 * Tf) + (0.1 * Tg))))

Taf

#Densidad del aire cerca al follaje y al sustrato calculado con la Ley de los
Gases Ideales [Kg/m^3]

d_af <- c((Patm * M) / (R * Tf))

d_af

d_ag <- c((Patm * M) / (R * Tg))

d_ag

#Longitud de rugosidad de la planta [m] (Frankenstein & Koenig, 2004)

Zo_f <- c(0.131 * (Zf^0.997))
d <- length(Zo_f)
Zo_freal <- c()
for (i in 1:d) {
  if (Zo_f[i] < 0.02 ) {
    Zo_freal[i] <- 0.02
  }
  else if (Zo_freal[i] <- Zo_f[i]){
  }
}
print(Zo_freal)

#Altura de desplazamiento cero [m]

Zd <-c( 0.701 * (Zf^0.975))

Zd

#Coeficiente de transferencia a granel en la superficie superior del follaje

Chn_f <- c((kv/(log((Za-Zd)/Zo_freal)))^2)

Chn_f

#Velocidad del viento dentro del follaje - Se vuelve W en caso de ausencia de
vegetación [m/s]

Waf <- c((0.83 * Sf * sqrt(Chn_f) * W_real) + ((1 - Sf) * W_real))

Waf

```

```

#Velocidad del viento dentro del follaje - considerando el excenario 1 donde Sf
= 1 [m/s]
Waf1 <- c((0.83 * sqrt(Chn_f) * W_real))
Waf1

#Velocidad del viento dentro del follaje - considerando el excenario 1 donde Sf
= 0 [m/s]
Waf2 <- c( W_real)
Waf2

#Coeficiente de transferencia a granel para el flujo de aire dentro del follaje
[s/m] (Sf = 1)
Cf <- c(0.01 * (1+(0.3/Waf1)))
Cf

#Coeficiente de transferencia a granel cerca de la superficie del sustrato
Chn_g <- c(((kv/(log((Za-Zd)/Zo_g)))^2)/ rch)
Chn_g

#Número de Richardson
Rib <- c((2 * g * Za * ( Taf - Tg))/(Waf1^2*(Taf + Tg)))
Rib
m <- length(Rib)

#Valor Gama para determinar el coeficiente de transferencia del flujo de calor
sensible al granel para el medio de crecimiento (sustrato)
Ga <- c()
for (j in 1:m) {
  if (Rib[j] < 0) {
    Ga[j] <- (1-((9.4 * Rib[j])/sqrt(1 + 7.4 * Chn_g * 9.4 * sqrt(Za/Zo_g) *
abs(Rib[j])) )))
  } else if (Rib[j] == 0) {
    Ga[j] = 1
  } else {
    Ga[j] <- (1/(1 + (4.7 * Rib[j]))^2)
  }
}
print(Ga)

```

```

#Factor de corrección para la estabilidad del intercambio de calor sensible
Ch_g <- c(Ga * (((1 - Sf) * Chn_g) + ( Sf * Chn_f)))
Ch_g

#Factor de corrección para la estabilidad del intercambio de calor sensible
suelo lleno de vegetación, Sf = 1
Ch_g1 <- c(Ga * ( Chn_f))
Ch_g1

#Factor de corrección para la estabilidad del intercambio de calor sensible
suelo sin vegetación, Sf = 0
Ch_g2 <- c(Ga * ((Chn_g)))
Ch_g2

#Coeficiente del flujo de transferencia de calor sensible, follaje [W/m^2 * K]
( la eo puede sobrar por la corrección de tabares " An investigation of sensible
heat fluxes at a green roof in a laboratory setup", aunque Konkov(2018) la
incluye como un ajuste)
hf <- c((1.5 * LAI * d_af * cp_a * Cf * Waf))
hf

#Coeficiente del flujo de transferencia de calor sensible, follaje [W/m^2 * K]
( Para Sf = 1)
hf1 <- c((1.5 * LAI * d_af * cp_a * Cf * Waf1))
hf1

#Coeficiente del flujo de transferencia de calor sensible, follaje [W/m^2 * K]
McAdam's Method
hf_mcadams <- 5.9 + ((4.1 * W_real)*((511+294)/(511+ Ta)))
hf_mcadams

#Coeficiente del flujo de transferencia de calor sensible, sustrato lleno de
vegetación[W/m^2 * K]
hg <- c((d_ag * cp_a * Ch_g * Waf))
hg

```

```
#Coeficiente del flujo de transferencia de calor sensible, sustrato lleno de
vegetación[W/m^2 * K] (Sf = 1)
```

```
hg1 <- c((d_ag * cp_a * Ch_g1 * Waf1))
```

```
hg1
```

```
#Coeficiente del flujo de transferencia de calor sensible, sustrato sin
vegetación [W/m^2 * K] (Sf = 0)
```

```
hg2 <- c((d_ag * cp_a * Ch_g2 * Waf2))
```

```
hg2
```

```
#Flujo de calor sensible follaje [W/m^2] (Ayata et. al, 2011)
```

```
Hf <- c(hf * (Tf-Taf))
```

```
Hf
```

```
#McAdam's Method
```

```
Hff <- 2 * hf_mcadams * (Tf -Ta)
```

```
Hff
```

```
#Flujo de calor sensible follaje [W/m^2] (Ayata et. al, 2011) (Para Sf=1)
```

```
Hf_1 <- c(hf1 * (Tf-Ta))
```

```
Hf_1
```

```
#Flujo de calor sensible sustrato [W/m^2] ((Ayata et. al, 2011)) ( se considera
Taf pues no se asume la ausencia de vegetación)
```

```
Hg <- c(hg * (Tg -Taf))
```

```
Hg
```

```
#Flujo de calor sensible sustrato [W/m^2] ((Ayata et. al, 2011)) ( no se
considera Taf pues se asume la ausencia de vegetación)
```

```
Hg_1 <- c(hg1 * (Tg -Ta))
```

```
Hg_1
```

```
#Flujo de calor sensible sustrato [W/m^2] ((Ayata et. al, 2011)) ( no se
considera Taf pues se asume la ausencia de vegetación)
```

```
Hg_2 <- c(hg2 * (Tg -Ta))
```

```
Hg_2
```

```
#####Calor convectivo según Tabares & Srebric (2011) #Se tuvo en cuenta
valores teóricos para aire seco de Kreith (2011 A-26)
```

```
#Conductividad del medio de crecimiento
```

```
k_por <- ((0.85 * 0.5) + ((1 - 0.85)* 0.5))
```

```
#Calor específico del agua
```

```
cp_w <- 4179
```

```
#Calor específico teniendo en cuenta como valor máximo el calor específico de
la materia orgánica = 2470 y mínimo el calor específico de la perlita = 837 ;
ambos presentes en el caso de estudio.
```

```
cp_substrate <- 1653.5
```

```
#Difusividad térmica
```

```
a_por <- (k_por/(1 * cp_substrate))
```

```
#####
```

```
#Método 1 para escoger número de Nusselt:
```

```
#Coeficiente de dilatación térmica
```

```
beta <- 3.5 * 10 ^-3
```

```
#Viscosidad cinemática
```

```
v_cin <- 14.08 * 10^-6
```

```
#Número de Reynolds
```

```
Re <- ((W_real * L_g) / (v_cin))
```

```
Re
```

```
#Número de Grashof
```

```
Gr <- ((g * beta * (Tg-Ta) * (L_g^3)) / ((v_cin)^2))
```

```
Gr
```

```

#Parametro para flujo turbulento
(0.068 * (Re ^2.2)) - Gr

#Como lo cumple, se aplica la siguiente fórmula para el número de Nusselt
Nu_tab <- (3 + (1.25 * (0.025 * (Re ^0.8))))

#####
#Método 2 ESCOGIDO -> (Propio de tabares para el escenario Sf = 1) :

#Número de Péclet
Pe <- c((0.3 * W_real * L_g) / a_por)

#Número de Nusselt de acuerdo a la relación con el número de Peclet
Nu <- c(1.128 * (Pe^0.5))

#####

#Método 3:

#Alterno para definit número de Nusselt
Nu_1 <- c((hf1 * L_g) / k_por)

#FLujo de calor convectivo
Q_convection_plants <- Hf_1
Q_convection_plants
Pe <- c((Nu / 1.128)^2)
h_por <- c((k_por * 1.128 * ((Pe^0.5))) / L_g)
h_sub <- ((h_por * hf1) / (h_por + hf1))
h_sub
Q_convection_substrate_cov <- c(h_sub * (Tg - Ta))
Q_convection_substrate_cov

```

```
#####Cálculos para complementar entradas Convección (Calor latente)#####
```

```
#Presión de vapor aire (Frankenstein & Koenig, 2004) [Pa]
e_a1 <- c(ea_0 * RH * exp((a_w * (Ta - 273.16)) / (Ta - b_w)))
e_a <- e_a1 / 1000
```

```
#Presión de vapor follaje (Frankenstein & Koenig, 2004) [Pa]
e_f1 <- c(ea_0 * RH * exp((a_w * (Tf - 273.16)) / (Tf - b_w)))
e_f <- e_f1 / 1000
```

```
#Presión de vapor sustrato (Frankenstein & Koenig, 2004) [Pa]
e_g1 <- c(ea_0 * RH * exp((a_w * (Tg - 273.16)) / (Tg - b_w)))
e_g <- e_g1/1000
```

```
####Resistencia Stomatal (Frankenstein & Koenig, 2004 y Konkov, 2018)#####
```

```
#Resistencia a la difusión de vapor atmosférica y de las plantas [s/m]
ra<- c(1/(Cf * Waf))
ra
```

```
#Función de la disponibilidad de radiación solar en la raíz de la planta
f_suncalculado <- c(((0.004 * Is) + 0.005) / (0.81 * ((0.004 * Is) + 1)))
```

```
l <- length(f_suncalculado)
```

```
f_sun <- c()
for (k in 1:l) {
  if (f_suncalculado[k] < 1 ) {
    f_sun[k] <- f_suncalculado[k]
  } else if (f_suncalculado[k] == 1) {
    f_sun[k] <- 1
  }else {
    f_sun[k] <- 1
  }
}
print(f_sun)
```

```

#Función de la disponibilidad de humedad en la raíz de la planta
f_mc <- c((MC_root - MC_min) / (MC_max - MC_min))

#Resistencia estomatal [s/m]
rs_calculado<- c((rs_min/LAI) * 1/(f_sun) * 1/(f_mc))
r1 <- length(rs_calculado)
rs1 <- c()
for (i in 1:r1) {
  if (rs_calculado[i] > 1125 ) {
    rs1[i] <- 1125
  }
  else if (rs1[i] <- rs_calculado[i]){
  }
}
print(rs1)

#Relación de humedad en la superficie del follaje
rt <-c(ra/(ra + rs1))

rt

####Resistencia Stomatal (TESIS TABARES & Tabares & Srebric,
2011)#####

####revisar tabares, a lo mejor no va 1/ F
F_SOLAR <- c(1+ exp((-0.034)*(Is - 3.5)))
F_VPD <- c(1/(1 - (0.41 * log((abs((e_f)-(e_a))))))) # Error por Ln de un
negativo, esperar a medir con equipo arduino
F_TEMP <- c(1/(1 - (0.0016 * (35 - (Tf - 273.15))^2))) ### Esta ecuación
cambió con la validación OJOO## (Tabares & Srebric, 2011)

#(1) 0.55 for fully saturated (Denardo 2003), (2) 0.34
#for field capacity (Denardo 2003), and (3) 0.02 for wilting point (Berghage
R., pers. comm.,September 9, 2008).
F_VWC <- c()
q <- length(Mg_medido)
for (i in 1:q) {
  if (Mg_medido[i] > (0.7 * 0.34)) {
    F_VWC[i] <- 1
  } else if (Mg_medido[i] < 0.02) {
    F_VWC[i] <- 1000
  }else {
    F_VWC[i] <- ((0.7 * 0.34) - 0.02) / (Mg_medido[i] - 0.02)
  }
}
}

```

```

print(F_VWC)
rs <- (rs_min / LAI) * (F_SOLAR) * (F_VPD) * (F_TEMP) * (F_VWC)
rs

#####Entradas Conductividad#####

#Conductividad del sustrato - Perlita, hummus de lombriz y tierra negra (Vera
et. al, 2017) [W/m * K]
k_g1 <-rep(0.208, 111)

#Conductividad del sustrato - Suelo constituido principalmente por pizarra
expandida(tipo de lutita) (Tabares & Srebric, 2011) [W/m * K]
k_g <- (0.2)+((1.4) *(Mg_medido))

#Conductividad Capa filtrante - Geotextil no tejido 1600 (Martínez, 2016) [W/
(m * K)]
k_filt <- rep(0.14, 111)

#Conductividad Capa drenante - (Martínez,2016) [W/ (m * k)]
k_drain <- rep(0.285, 111)

#Conductividad Capa anti-raíz - Manto Poliéster 40 Anti Raíz (Martínez, 2016)
[W/ (m * K)]
k_anti <- rep (0.275, 111)

#Conductividad Capa impermeabilizante - Manto asfáltico (Martínez, 2016) [W/ (m
* k)]
k_imp <- rep(0.692, 111)

#Conductividad Cubierta actual - Machimbre Pino cipres (Norma Chilena Oficial
NCh. 853, Of. 93) [W/ (m * k)]
k_roof <- rep (0.104, 111)

#Espesor Capa sustrato
L_g <- rep(0.1,111)

#Espesor Capa filtrante - Geotextil no tejido 1600 [m]
L_filt <-rep (0.001, 111)

```

```

#Espesor Capa drenante [m]
L_drain <- rep (0.008, 111)

#Espesor Capa anti-raíz - Manto Poliéster 40 Anti Raíz[m]
L_anti <- rep (0.0012, 111)

#Espesor Capa impermeabilizante [m]
L_imp <- rep (0.0032, 111)
#Espesor Cubierta actual - Machimbre Pino cipres [m]
L_roof <- rep (0.007, 111)

#Temperatura en la superficie del sustrato (Termoculpa con Arduino) [K]
temporalmente tiene valor de entrada Tg pero corresponde a la termoculpa en la
superficie del sustrato
T_top <- (Tg)

#####Cálculos Conductividad#####
#Resistencia térmica total del sistema en serie [(m^2 * K) / W]
R_n1 <- c(L_g / k_g)
R_n1

R_n2 <- c(L_filt / k_filt)
R_n2

R_n3 <- c(L_drain / k_drain)
R_n3

R_n4 <- c(L_anti / k_anti)
R_n4

R_n5 <- c(L_imp / k_imp)
R_n5

R_n6 <- c(L_roof / k_roof)

```

```

R_n6
R_n <- (R_n1 + R_n2 + R_n3 + R_n4 + R_n5 + R_n6)

#Coeficiente total de transferencia de calor por conducción [W/ (m^2 * K)]
U <- c(1/(R_n))
U

#####MODELO          TABARES          CUBIERTA          VERDE          SIN
VEGETACIÓN#####

#####Entradas y ecuaciones balance de energía cubierta sin
vegetación#####

#####Radiación de onda corta absorbida por la cubierta sin vegetación
[W/m^2]
Rsh_abs <- c((1- ag) * Is)

#####Transferencia de calor convectivo entre la superficie del sustrato y
el aire circundante [W/m^2]
Q_s_s_1 <- (Hg_2)

#####Transferencia de calor por Evaporación en sustrato
#Entalpía de vaporización del agua [kJ/Kg]
i_fg <- 2256.5

#Constante psicométrica
pp <- c((cp_a * (Patm))/(0.622 * i_fg))

#Resistencia aerodinámica [s/m]
ra <- c(143)

#Resistencia del suelo a la evaporación
c1 <- (0)
c2<- (34.5)
c3 <- (-3.3)

```

```

#(1) 0.55 for fully saturated (Denardo 2003), (2) 0.34
#for field capacity (Denardo 2003), and (3) 0.02 for wilting point (Berghage
R., pers. comm.,September 9, 2008).

#Densidad del agua [Kg/m^3]
Gp <- c(997)
r_substrate <- c(c1 + (c2*((VWC_av/MC_max)^(c3))))
Q_E <- c(((Gp * cp_a)/(pp * (r_substrate + ra))) * ((e_g - e_a)))
Q_E

#Flujo de calor por radiación de onda larga entre el suelo y el sustrato [W/m^2]

#Temperatura del cielo el cual también se puede tomar como Ta - 20°C
T_sky <- Ta
Q_IR <- c(eg * S * ( (Tg)^4) - ((T_sky)^4) )

#Balance sustrato sin vegetación (No se aplica, pero se considera la ecuación
para determinar la Temperatura_interna)

# Budget_bare_soil<- -Rsh_abs + Q_film + Q_cond, dónde Q_film involucra los
procesos: evaporación, transferencia de calor convectivo y por radiación (onda
corta y larga).

#####MODELO          TABARES          CUBIERTA          VERDE          CON
VEGETACIÓN#####

#####Entradas y ecuaciones balance follaje#####

#####Radiación de onde corta absorbida por el follaje [W/m2]
#Coeficiente de extinsión
ks <- 1

#Transmitancia de onda corta del follaje
tr_solar<- (exp((-ks * LAI)))

```

```

#Transmitancia de la radiación termica, radiación que pasa a traves del follaje
(Onda larga)
tr_plants <- 0.0755
R_sh_abs_plants <- c((1 - af - tr_solar)*(1 + (tr_plants * ag))* (Is))

#####Transferencia de calor convectivo en el follaje
Q_convection_plants <- (Hf_1)

#####Transferencia de calor por transpiración de la planta
#Entalpía de vaporización del agua [kJ/Kg]
i_fg <- 2257

#Constante psicométrica
pp <- c((cp_a * Patm)/(0.622 * i_fg))

#Resistencia aerodinámica [s/m]
ra <- 143
Q_T <- c((LAI) * ((Gp * cp_a)/(pp * (rs + ra))) * ((e_f - e_a)))
Q_T

#####Radiación térmica entre el cielo, las plantas y el sustrato
Q_IR_PLANTS_SKY <- ((1 - tr_plants) * (ef) * (S) * ((Tf^4) - (T_sky^4)))

#####Transferencia de calor entre plantas y el ambiente circundante
Q_film_plants <- c( Q_IR_PLANTS_SKY + Q_convection_plants + Q_T)

#####Transferencia de calor entre la capa vegetal y la superficie del sustrato
por radiación de onda larga
Q_IR_S_P_dimitri <- c((((1- tr_solar) * ef * eg * S)/(ef + eg - (ef*eg)))
*((Tf)^4 - (Tg)^4))
Q_IR_S_P <- c((1- tr_solar)* (S *(((Tf)^4 - (Tg)^4))/((1/eg)+(1/ef)-(1))))

```

```

#####Balance Follaje#####
#Budget_f <- -R_sh_abs_plants + Q_film_plants + Q_IR_S_P

#####Entradas y ecuaciones balance sustrato#####

#####Radiación de onde corta absorbida por el sustrato

R_sh_abs_substrate <- c((tr_solar)*(1 - ag)* (Is))

#####Transferencia de calor convectivo entre la superficie del sustrato y
el aire circundante [W/m^2]

Q_s_s_2 <- Q_convection_substrate_cov

#####Transferencia de calor entre el sustrato y la capa vegetal por
radiación de onda larga

Q_IR_S_P

#####Radiación térmica entre el cielo, las plantas y el sustrato

Q_IR_SUBSTRATE_COV_SKY <- c((tr_plants) * (eg) * (S) * ((Tf^4) - (T_sky^4)))

#####Balance Sustrato#####

#Budget_g <- -R_sh_abs_substrate -Q_IR_S_P + Q_s_s_2 + Q_cond_vegetatedsoil +
Q_IR_SUBSTRATE_COV_SKY + Q_E

#Rapidez del flujo de calor por unidad de área es [W/m2]:

#Teniendo en cuenta la ecuación: Q_cond <- c(U * (T_top - Temperatura_interna)),
se continua con el despeje de la Temperatura interna para ambos escenarios

#Temperatura interna (machimbre) de acuerdo al balance de energía para el
sustrato considerando vegetación

Temperatura_interna_covered <- c(((R_sh_abs_substrate + Q_IR_S_P -
Q_convection_substrate_cov - Q_IR_SUBSTRATE_COV_SKY + Q_E) / (-U)) + (Tg))

Tg - Temperatura_interna_covered
sum(Tg - Temperatura_interna_covered)

```

```

#Temperatura interna (machimbre) de acuerdo al balance de energía para el
sustrato sin considerar vegetación con base en el balance

# Temperatura_interna_bare <- (((Rsh_abs - ((Q_s_s_1 + Q_IR + Q_E)) )/ (-U)) +
Tg)

#Temperatura real del machimbre usando análisis en paralelo propuesto por
Tabares & Srebric (2011).

T_machimbre <- c((Sf * (Temperatura_interna_covered)) + ((1 - Sf)*
(Temperatura_interna_bare)))

T_machimbre
Tg - T_machimbre
sum(Tg - T_machimbre)

#Flujo a traves del techo sin veg
Q_cond_bare <- Rsh_abs - Hg + Q_E - Q_IR

#Flujo a traves del techo con veg
Q_cond_covered <- R_sh_abs_substrate + Q_IR_S_P - Q_s_s_2 -
Q_IR_SUBSTRATE_COV_SKY + Q_E

#Se considera la transferencia de calor a traves del techo como :
Q_sustrato <- c((Sf * (Q_cond_covered )) + ((1 - Sf)* (Q_cond_bare)))

#Finalmente Se asume el flujo de calor en estado estable a través de estructuras
compuestas para determinar la temperatura de la habitación del caso de estudio,
por lo que Q_cond = Q_conv:

# Para esto es necesario considerar como entrada el coeficiente de transferencia
de calor por convección libre o natural del aire [W/(m2 K)]
h_air <- 11.35

# Al considerar aire dentro de la habitación se plantea para el cálculo de la
Temperatura de la misma la ecuación de calor por convección : Q_conv = h_air
* (T_machimbre - T_cuarto)

# Por lo que al despejar la variable de interes se tiene :
T_cuarto <- c((Q_sustrato/-h_air) + T_machimbre )
T_cuarto

```