

Universidad
Autónoma
Metropolitana



Casa abierta al tiempo **Azcapotzalco**

DIVISIÓN DE CIENCIAS Y ARTES PARA EL DISEÑO
Especialización, Maestría y Doctorado en Diseño

UTILIZACIÓN DEL SISTEMA DE HUERTOS URBANOS EN CUBIERTAS PARA EL MEJORAMIENTO DEL CONFORT TÉRMICO DE UN ESPACIO

Kenzo Mauricio Arvizu Hayama

Tesis (ICR) para optar por el grado de Maestro en diseño bioclimático
Posgrado en diseño bioclimático

Miembros del Jurado:

Dr. E. Israel Tovar Jiménez
Director de la tesis

Dr. Arq. Aníbal Luna León
Co-Director de la tesis

Jurado
Mtra. Gloria Ma. Castorena Espinosa
Arq. Alfonso Muray Kobory
Mtro. Manuel Domingo Gordon Sánchez
Dr. Aníbal Figueroa Castrejón

Ciudad de México
Mayo 2018

Para y por mi familia

Agradezco a mis padres y hermana por alentarme a explorar y cumplir nuevas metas, siempre presentes en todas las etapas de mi vida, siendo un ejemplo de constancia y honestidad.

A mis profesores y miembros del jurado, sin los cuales esta investigación no hubiera podido llevarse a cabo, mi aprecio y admiración para ellos, por no solo ser un ejemplo para mí como profesionalista si no también como persona.

A mis amigos, que son mi segunda familia, a Adrián, Mariana, Sandra, Gabriel e Iván, por compartir este proceso junto a mí, repleto de nuevas experiencias, y nuevos proyectos.

Diversos estudios y metodologías han demostrado que un sistema de vegetación aplicado a cubiertas, usualmente conocido como azotea verde, es capaz de brindar beneficios ambientales y económicos a los usuarios que deciden adoptar este tipo de soluciones. A la par de esto, en la actualidad ya existen modelos y mediciones relacionados a la transferencia térmica en sistemas de azoteas verdes, los cuales nos permiten cuantificar la aportación de las mismas al proyecto bioclimático, sin embargo, no se han determinado los valores termo físicos y los valores cuantitativos que un sistema de huertos urbanos aplicado como un sistema de azoteas verdes puede brindar en la Ciudad de México.

Existen diversos ejemplos de ciudades que han adoptado la agricultura urbana como una medida para que sus habitantes puedan obtener alimentos frescos, cultivados de manera más orgánica, sin la necesidad, en algunos casos, de que estos deban de ser transportados a través de grandes distancias.

Estos huertos han transformado espacios sin utilidad, en sistemas económicamente redituables, capaces de generar una amplia variedad de productos, servicios y empleos dentro de las comunidades que los adoptan.

Tomando a consideración lo ya mencionado, el constante crecimiento y renovación que está sufriendo el parque construido del área metropolitana de la Ciudad de México y la necesidad de brindar alimentos frescos a los habitantes de la misma, es que se ha generado un nicho de oportunidad para que se adopten nuevos sistemas constructivos y se replanteen los beneficios que un área verde puede brindar.

En este documento se presenta la metodología seguida para realizar un análisis comparativo entre el comportamiento térmico de un sistema de azotea verde el cual funciona a la vez como una hortaliza, con un sistema constructivo sin vegetación.

Palabras clave: Azotea verde, comportamiento térmico, hortaliza

1	introducción	9
1.1	Definición del problema:	10
1.2	Pertinencia de la investigación:	11
1.3	Tipo de investigación:	11
1.4	Hipótesis:	11
1.5	Objetivo general:	12
1.6	Objetivos particulares:	12
2	Estado del conocimiento	13
2.1	Sistemas de azoteas verdes, clasificación, beneficios y desventajas	14
2.1.1	Introducción	14
2.1.2	Clasificación	14
2.1.3	Beneficios y desventajas de los sistemas de azoteas verdes	16
2.2	Casos análogos de azoteas verdes.	18
2.2.1	Alemania.....	18
2.2.2	México	19
2.3	Agricultura urbana.	20
2.3.1	Beneficios y desventajas.	20
2.3.2	Casos análogos.....	22
2.4	Cultivo biodinámico o biointensivo.	23
2.5	Estudios térmicos relacionados a los sistemas de cubiertas vegetales	25
3	Climatología.....	31
3.1	Ubicación.....	32
3.2	Clima	33
3.3	Caso de estudio.....	34
3.4	Temperatura	35
3.5	Humedad relativa	36

3.6	Radiación.....	36
3.7	Viento	37
4	Armado de módulos de pruebas	39
4.1	Selección de vegetación	40
4.2	Especies seleccionadas	42
4.3	Selección de sustrato	45
4.3.1	Equipo utilizado	45
4.3.2	Procedimiento utilizado para realizar la experimentación.....	46
4.3.3	Mediciones de peso en distintas condiciones de humedad	48
4.3.4	Resultados.....	49
4.4	Armado de charolas de cultivo	53
4.4.1	Equipo utilizado:	53
4.4.2	Procedimiento utilizado para realizar la experimentación.....	54
4.4.3	Preparación de las charolas:	54
5	Determinación de conductancia promedio de tres arreglos de vegetación	56
5.1	Pruebas en conductímetro	57
5.1.1	Conductímetro térmico (laboratorio de energía solar, UAM Azc.)	57
5.1.2	Equipo utilizado:	57
5.1.3	Procedimiento utilizado para realizar la experimentación.....	58
5.1.4	Resultados.....	59
5.2	Pruebas en simulador de radiación solar	61
5.2.1	Radiación PAR en la vegetación.....	61
5.2.2	Calibración del simulador para obtención PAR.....	62
5.2.3	Equipo utilizado:	66
5.2.4	Procedimiento utilizado para realizar la experimentación.....	66
5.2.5	Resultados y análisis.....	68
5.3	Cálculo de conductancia promedio	71
5.3.1	Método simplificado obtenida mediante la ecuación $\Lambda = e \cdot q / A \cdot \Delta t$	71

5.3.2	Método propuesto por Mária Machadoo, Celina Brito y Javier Neila	72
6	Datos para simulación en modelo numérico	74
6.1	Pesos y volumen	75
6.1.1	Equipo utilizado	75
6.1.2	Procedimiento utilizado para realizar la experimentación:	75
6.1.3	Resultados.....	76
6.2	Factor de cobertura	77
6.2.1	Equipo utilizado	77
6.2.2	Procedimiento utilizado para realizar la experimentación:	77
6.2.3	Resultados y análisis.....	78
6.3	Tasa de evaporación	79
6.3.1	Equipo utilizado	79
6.3.2	Procedimiento utilizado para realizar la experimentación:	80
6.3.3	Resultados.....	81
6.4	Índice de área foliar, LAI	84
6.4.1	Equipo utilizado	84
6.4.2	Procedimiento utilizado para realizar la experimentación:	84
6.4.3	Resultados.....	86
6.5	Absortancia.....	87
6.5.1	Equipo utilizado	87
6.5.2	Procedimiento utilizado para realizar la experimentación:	87
6.5.3	Resultados.....	88
7	Análisis de transferencia térmica	89
7.1	Introducción a la simulación de modelo numérico	90
7.2	Procedimiento.....	90
7.2.1	Cubierta vegetal en Design Builder.....	91
7.3	Resultados.....	92

7.3.1	Caso 1 comparación entre la temperatura superficial del interior y exterior de la cubierta en el día típico periodo cálido, 20 de mayo.....	92
7.3.2	Caso 2 comparación entre la temperatura superficial del interior y exterior de la cubierta en el día típico periodo frío, 9 de noviembre.	97
7.3.3	Caso 3 consumo energético anual por uso de equipos de aire acondicionado y calefacción. 101	
8	Síntesis de resultados	104
8.1	Síntesis y discusión de resultados	105
9	Conclusiones de la investigación	112
9.1	Conclusiones	113
10	Referencias	116

1 Introducción

Definición del problema:

En la actualidad, pese a que ya existen modelos y mediciones relacionados a la transferencia térmica, los cuales nos permiten cuantificar la aportación de sistemas de naturación como las azoteas verdes, al proyecto bioclimático, no se han determinado los valores termo físicos y los valores cuantitativos que un sistema de huertos urbanos aplicado como un sistema de azoteas verdes puede brindar.

Las grandes ciudades, como Nueva York, han adoptado el sistema de huertos urbanos como una medida para que sus habitantes puedan obtener alimentos frescos, cultivados de una manera más orgánica, reduciendo también así la distancia que estos deben de ser transportados. Estos huertos se han transformado en sistemas económicamente redituables puesto que brindan a sus usuarios una amplia variedad de productos y servicios.

Un ejemplo de lo anteriormente mencionado es el Brooklyn Grange fundada en el año 2010, es la principal “Granja de azotea” en los Estados Unidos con una producción vegetal, cultivada de manera orgánica, de más de veintidós mil kilogramos por año, en una superficie de más de diez mil metros cuadrados.

Adicional a esto Brooklyn Grange brinda otros servicios como son; consultoría, instalación de servicios, producción de miel, organización de eventos además de contar con numerosas colaboraciones con comercios e instituciones educativas locales. (Brooklyn Grange Rooftop Farm, 2005)

Este tipo de esquemas de trabajo y beneficios brinda una perspectiva diferente a las áreas verdes grandes urbes, ya que esta clase de sistemas genera servicios económicos y ambientales, los cuales ven reflejados tanto en los usuarios como en el medio ambiente. Entender y plantear las áreas verdes de esta manera y no sólo para que cumplan la función de ornato, genera que estos espacios no sean vistos únicamente como un gasto, sin embargo, este tipo de sistemas podría brindar aún más beneficios en la parte relacionada con el confort térmico de los usuarios al interior del edificio.

En la Ciudad de México esta clase de sistemas, pese a la existencia de programas e instituciones, como la SEDEMA o el GDF (hoy gobierno de la Ciudad de México), que promueven la creación de este tipo de proyectos mediante incentivos y talleres, han sido adoptados más como pasatiempos, o como una terapia de integración y ocupación familiar en vez de ser tomados como una alternativa de cultivo dentro de la ciudad. (Secretaría Del Medio Ambiente CDMX , 2017)

El costo de instalación de un techo verde es variable, dependiendo del área que se quiera abarcar, el tipo de vegetación que se utilizara, entre otras variables. Sin embargo, se estima que el costo estimado por metro cuadrado oscila entre los 1200.00 y 3500.00 MN (azoteas verdes) y en algunos casos los usuarios que optan por este tipo de sistemas sumado al costo inicial, debido al tipo de sistemas constructivos típicos

de la mayoría del parque construido de la Ciudad de México, es necesaria una inversión para reforzar la estructura del edificio en donde se plantea la azotea verde

Se estima que el costo de mantenimiento de un techo verde tradicional es de aproximadamente 300 dls/m² tomando en cuenta un sistema de riego tecnificado sumado a los costos de mantenimiento por riego, controles de plagas, abonos, el tiempo que se le debe de invertir y que, en la mayoría de las ocasiones, han propiciado que esta clase de sistemas sean desestimados por considerarse de carácter deficitario. (COLUMBIA GREEN TECHNOLOGIES)

1.1 Pertinencia de la investigación:

Por lo ya mencionado, sumado al crecimiento y renovación que está sufriendo el parque construido del área metropolitana de la Ciudad de México, se ha generado un nicho de oportunidad para que se adopten nuevos sistemas constructivos y se replanteen los beneficios que un área verde puede brindar.

La creación de un sistema integral cubriría necesidades que toda ciudad en crecimiento debe de abatir, como son la necesidad de alimentos frescos para sus habitantes y la creación de espacios verdes necesarios para contrarrestar efectos de isla de calor y mejorar la calidad del aire a esto se debe de agregar los beneficios térmicos que este traería a los edificios donde se implemente el sistema, así como que el mismo sistema además de generar beneficios térmicos, genera beneficios económicos gracias a los productos obtenidos de las hortalizas

1.2 Tipo de investigación:

La presente investigación es de corte experimental por lo que todos los procedimientos realizados durante la realización de la misma fueron determinados y realizados siguiendo el método científico.

1.3 Hipótesis:

Una cubierta vegetal formada con especies comestibles, brindará beneficios térmicos al edificio, mayores a los de una cubierta tradicional, con el beneficio agregado de hacerla económicamente productiva. Lo que permitirá que en vez de ser deficitaria como actualmente suele ocurrir, propicie beneficios económicos.

1.4 Objetivo general:

Determinar las aportaciones térmicas, que una azotea verde que funcione a manera de huerto, pueda brindar al edificio.

1.5 Objetivos particulares:

Determinar las especies vegetales comestibles, que puedan cumplir con las características fisionómicas y térmicas.

Determinar un modelo adecuado de cálculo para cuantificar el desempeño térmico de un huerto como azotea verde.

Generar los datos termo físicos de las especies y los sistemas a utilizar.

2 Estado del conocimiento

2.1 Sistemas de azoteas verdes, clasificación, beneficios y desventajas

2.1.1 Introducción

Hoy en día, el uso de sistemas vegetales denominados azoteas verdes se ha vuelto cada vez más frecuente en el proyecto arquitectónico, solución adoptada por los arquitectos como una medida sustentable e innovadora pese a que el uso de este tipo de sistemas ha sido utilizado por distintos países desde siglos atrás.

Los sistemas actuales de techos verdes tienen su base en los sistemas aplicados en Alemania durante los primeros años de la década de 1960, y de ahí que se empezara a reproducir este tipo de soluciones en otros países. (Penn State Center for Green Roof Research, 2008).

En la actualidad este tipo de soluciones han sido adoptadas por grandes ciudades alrededor del mundo, sin embargo, los países europeos son los que se encuentran a la vanguardia en este tipo de sistemas, puesto que han sido capaces de generar normatividad y asociaciones especializadas en la materia, que sirven como parámetro para el resto del mundo. Uno de estos ejemplos es la European Federation of Green Roof Associations –EFB, la cual está conformada por países como son Alemania, Italia, Holanda, Austria, Reino Unido entre otros. (European Federation of Green Roof Associations, s.f.)

2.1.2 Clasificación

Los sistemas de techos verdes pueden ser clasificados en dos tipos; los intensivos y los extensivos, lo anterior se determina de acuerdo a la profundidad del medio cultivo y del grado de mantenimiento que requiera el sistema, lo anterior es determinado por las necesidades de la vegetación con la que cuente la azotea.

Los sistemas de carácter intensivo son aquellos que requieren un mayor mantenimiento, irrigación, abono, entre otros cuidados, además de requerir un espesor de sustrato considerable puesto que pueden recibir especies de mayor tamaño, usualmente este tipo de sistemas soportan entre 390 y 730 kg/m², a diferencia de los extensivos los cuales son diseñados para que su mantenimiento sea mínimo y usualmente solo son visitados cuando se requiere dar mantenimiento, y cuentan en su mayoría con una fórmula especial de sustrato para aligerar su peso que suele ser de entre 50 y 120 kg/m², por lo general las especies utilizadas en este tipo de azoteas son las de tipo Sedum o musgos (rain garden network, 2003)

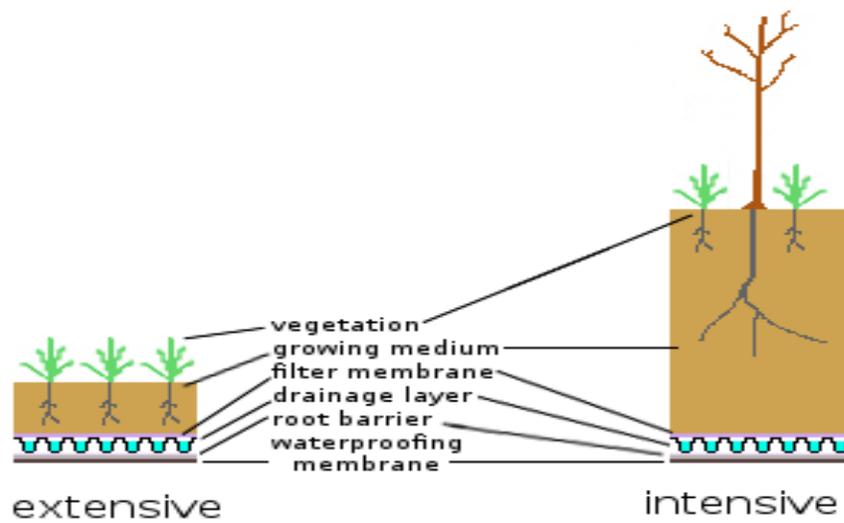


Figura 1 Diferencias sistemas azoteas verdes (KVDP, 2014)

La siguiente tabla muestra un comparativo entre los dos tipos de azoteas verdes en relación a los sustratos de cada una de ellas.

	Extensive	Intensive
Clay and silt content	≤15% by mass	<20% by mass
Proportion of particles > 4mm in diameter	≤ 50% by mass	≤ 40% by mass
Organic matter	≤ 65 g/l (FLL)10-25% (CUGE)	≤ 90 g/l (FLL)5–10% (CUGE)
Settling	No more than 10% of nominal depth	Average of ≤ 5 cm for substrates at least 50 cm deep
Water permeability	0.6 – 70 mm/min	0.3 – 30 mm/min
Water storage capacity	> 35% by volume	≥ 45% by volume (maximum of 65%)
Air-filled porosity	≥ 10%	≥ 10%
pH	6.0 – 8.5	6.0 – 8.5
Total soluble salts	1.5 – 3.5 g/l	1.5 – 2.5 g/l

Tabla 1 Propiedades de los sustratos en un sistema de azoteas verdes (Handreck and Black, s.f.)

Los sistemas de azoteas vegetales están conformados por distintas capas, y se deben de seguir ciertos pasos para el correcto funcionamiento del mismo. Antes que nada, la superficie debe de encontrarse limpia y sin ningún tipo de grietas u oquedades, posterior a esto se debe de colocar capa geotextil sobre la cual se colocará el impermeabilizante, posterior a esto se debe de montar la membrana para el drenaje, a continuación, se coloca un sistema anti raíz para delimitar el crecimiento de las plantas que se utilizarán para finalmente colocar la capa de sustrato y la vegetación que llevará el sistema.



Figura 2 sistema azotea verde (IMPERQUIMIA S.A. De C.V, 2012)

2.1.3 Beneficios y desventajas de los sistemas de azoteas verdes

Los principales beneficios que la instalación de un sistema de azoteas verdes puede brindar son relacionados con servicios ecológicos, sin embargo, en la actualidad existen diversos incentivos económicos para que las personas adopten este tipo de soluciones como una inversión: (European Federation of Green Roof Associations, s.f., s.f.)

Algunos de los beneficios (ambientales) que puede proveer un sistema de azoteas verdes son:

Reducción del calentamiento hacia adentro del edificio al proveer una capa de masa extra la cual funciona aumentando la resistencia térmica de la azotea. Un estudio realizado por la University of Toronto mostró que el uso de este tipo de sistemas también permite que exista una pérdida menor de calor al interior de los espacios, lo cual se ve reflejado en ahorros de energía en lugares con inviernos muy fríos (Brad Bass, 2005)

Funcionamiento como sistema de “refrigeración” de acuerdo a las investigaciones realizadas por Elena Palomo del Barrio pese a que los sistemas de azoteas verdes no funcionan como dispositivos de refrigeración estos trabajan a manera de aislantes lo que reduce el flujo de calor a través del techo (Barrio, 1998)

Un techo verde de 20cm de sustrato de tierra y arcilla expandida es capaz de almacenar hasta 90 litros de agua por m² (Universidad de Granada)

Debido al proceso de fotosíntesis en donde la vegetación atrapa partículas de dióxido de carbono y expulsa partículas de oxígeno, mientras exista un equilibrio del crecimiento y renovación de la vegetación, el sistema siempre funcionará como un extractor de dióxido de carbono (Universidad de Granada)

Las plantas ayudan a regular la humedad del ambiente, mediante la formación de rocío cuando el aire es muy húmedo, mientras que, en el caso contrario, cuando el aire es muy seco, las plantas mediante evaporación son capaces de elevar la humedad relativa del aire. 1 hectárea de huerto es capaz de evaporar aproximadamente 1500 metros cúbicos durante un día caluroso (Universidad de Granada)

Funcionan como barrera acústica, la vegetación ayuda a reducir el ruido mediante la absorción (transformación de la energía sonora en energía de movimiento), reflexión y deflexión (Universidad de Granada)

Creación de nuevos hábitats (Universidad de Granada)

Combate el efecto de isla de calor mediante la evo-transpiración una azotea verde ayuda a reducir la temperatura de la superficie de la azotea y el aire a su alrededor (United States Environmental Protection Agency)

Otros beneficios que brindan los sistemas de azoteas verdes pueden ser; reducción del uso de energía para calentar o enfriar una habitación, reducción del estrés asociado a las ondas de calor, mejoran la calidad de vida al proveer un valor estético a los espacios.

(United States Environmental Protection Agency)

Las principales desventajas generadas por este tipo de sistemas son:

La carga muerta que en ocasiones genera un gasto importante para la reestructuración del espacio donde se va a instalar el sistema, lo cual obviamente se traduce en una mayor inversión económica.

El costo estimado según la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU., EPA por sus siglas en inglés, es de 110.00dls aprox. por m² en el caso de un sistema extensivo, mientras que, para una azotea intensiva, considera un costo de 250.00dls aproximadamente por m² (United States Environmental Protection Agency)

A lo anterior es necesario contemplar el mantenimiento que cualquier espacio con vegetación requiere, el cuidado de la vegetación, control de plagas, revisar que el funcionamiento del sistema se encuentre en buen estado. Lo anterior en muchas ocasiones es la causa por la cual se desestima este tipo de sistema, la EPA estima que el mantenimiento de este tipo de sistemas oscila en un rango de entre 7.50dls y 15dls por metro cuadrado (United States Environmental Protection Agency)

Con el fin de desarrollar un estudio completo de ciclo de vida con respecto a los beneficios de una azotea verde contra los de una azotea con un sistema constructivo convencional, mediante un estudio, la Universidad de Michigan, comparó los costos que implicarían realizar una azotea de 1950m² con todos los beneficios usualmente relacionados a las azoteas verdes. El resultado fue que la instalación de una azotea verde representaba un costo de 464,000.00dls en comparación a los 335,000.00dls que implicaría un sistema convencional, sin embargo, el techo verde representó un ahorro de casi 200,000.00dls durante su periodo de vida útil

(Clark, 2008)

2.2 Casos análogos de azoteas verdes.

2.2.1 Alemania

Sin duda alguna, los sistemas de azoteas verdes de la actualidad no podrían entenderse de la misma manera sin el desarrollo y avance tecnológico implementado en Alemania, donde el uso de sistemas de cubiertas vegetales no es considerado una innovación puesto que desde la década de 1970 las ciudades alemanas han procurado este tipo de soluciones.

Las guías de construcción de azoteas verdes como la publicada por la FLL, Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V., es en la actualidad referente para la normatividad en otros países. En estas guías se presenta la correcta instalación de sistemas de este tipo, algunas de ellas disponibles en inglés como “The German FLL-Guideline for the Planning, Execution and Upkeep of Green-Roof Sites”

(Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V., 2015)

Siendo la FLL, solamente una de las 40 asociaciones en Alemania, otra agrupación alemana dedicada a este tipo de soluciones es la FBB, Fachvereinigung Bauwerksbegrünung, fundada en 1990 después de la DDV, Deutscher Dachgaertner Verband, fundada en 1985. La FBB, fue fundada con el fin de entender la relación entre naturaleza y construcción, por lo que ambas industrias están igualmente representadas

dentro de la agrupación. Hoy en día aproximadamente cien compañías solicitan múltiples servicios para la asociación

(Deutschen Dachgärtner Verband e.V.!)

Para poder mencionar algunos ejemplos de azoteas verdes en Alemania, en realidad sería necesario nombrar ciudades enteras, como es el caso de Stuttgart, ciudad que cuenta con uno de los departamentos de parques y recreación, el cual, junto con la ayuda de múltiples universidades, han logrado mejorar e implementar a gran escala, los sistemas de azoteas verdes



Figura 3 Stuttgart (green roof safari, s.f.)

2.2.2 México

En México las cubiertas vegetales cada vez adquieren más popularidad como una solución para incorporar vegetación a los proyectos arquitectónicos, especialmente en los nuevos desarrollos dentro de las ciudades. Sin embargo, muchos de estos sistemas son propuestos y realizados por distintos proveedores que ofrecen múltiples beneficios a la construcción sin explicar en realidad el funcionamiento del sistema como tal.

Lo anterior permite a los usuarios la posibilidad de elegir entre una variedad de fabricantes y productos los cuales se pueden adecuar a las necesidades específicas de cada uno, en donde el costo aproximado por m² ronda entre los 1,200.00 M.N. y los 3,500.00 M.N. aproximadamente, entendiendo claro que para cada

caso pueden existir distintas variables que pueden llegar a modificar el costo de éstas. (azoteas verdes, s.f.)

Actualmente ya existe normatividad para regular las azoteas verdes en México, aunque es sólo aplicable para el Distrito Federal

NADF-013-RNAT-2007

NADF-006-RNAT-2004

El ejemplo más notable de azoteas verdes en México sin duda alguna es la que se encuentra en las oficinas del INFONAVIT, pues con más de 5,000 m² es la azotea verde más grande de América Latina. (el economista, 2015)



Figura 4 Azotea INFONAVIT, N. Gaia (*el economista*, 2015)

2.3 Agricultura urbana.

2.3.1 Beneficios y desventajas.

El rápido crecimiento de las ciudades del mundo genera múltiples exigencias que deben de ser cubiertas, una de estas necesidades es la producción y suministro de alimentos para sus habitantes.

Una de las alternativas que ha surgido para compensar esta problemática es el desarrollo de la agricultura urbana "la cual puede ser definida como el cultivo de plantas y la cría de animales en el interior y en los

alrededores de la ciudad” (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO, s.f.)

Este tipo de cultivos permite a los habitantes de las ciudades obtener productos frescos sin la necesidad de que estos sean transportados grandes distancias y requieren menor tiempo de refrigeración, lo que permite que se cultiven de manera más orgánica, estos mismos productos abastecen a mercados locales que pueden ofrecerlos a precios más accesibles. (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO, s.f.)

Sumado a lo anterior la agricultura urbana tiene otros beneficios tales como:

- Las hortalizas tienen un ciclo de producción más corto y en algunas ocasiones se pueden recolectar los productos a los 60 días
- Estos huertos pueden ser hasta 15 veces más productivos que las fincas rurales
- Un espacio de apenas un metro cuadrado puede proporcionar 20 kg de comida al año
- Se generan empleos
- La horticultura puede generar un empleo por cada 100 metros cuadrados de huerto con la producción, suministro de insumos, comercialización y el valor añadido del productor al consumidor.
- Dado que los alimentos producidos a nivel local requieren menos transporte y refrigeración, puede abastecer a los mercados cercanos con productos más frescos y nutritivos a precios más competitivos.
- AUP de acuerdo con la FAO – MICROHUERTOS
- Un metro cuadrado de huerto urbano produce:
 - unos 200 tomates (30kg) al año;
 - 36 piezas de lechuga cada 60 días;
 - 10 coles cada 90 días;
 - 100 cebollas cada 120 días.

(Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO, s.f.)

Sin embargo, la agricultura urbana tiene ciertas limitantes, por mencionar algunas; en algunos países no es reconocida dentro de las políticas agrícolas o de planeación urbana, por lo que no recibe apoyo de instituciones gubernamentales; el manejo de aguas debe de ser muy cuidadoso puesto que puede presentar riesgos para la salud.

Hoy en día este tipo de soluciones han ganado gran popularidad entre los habitantes de mega metrópolis e incluso la FAO ya apoya el uso de este tipo de sistemas de producción alimenticia, apoyando a los gobiernos a optimizar sus políticas y sistemas de producción (Organización de las Naciones Unidas para

la Alimentación y la Agricultura FAO, s.f.). En el caso de México el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) mediante la Subordinación de Tecnología Apropiada (STA), tiene a su cargo el modelo experimental de la casa ecológica para el medio urbano, en la cual se han realizado modificaciones para que se pudieran cultivar diversas especies vegetales en la azotea.

2.3.2 Casos análogos.

Quizá el proyecto más reconocido de agricultura urbana sea el Brooklyn Grange, ubicado en Nueva York, Brooklyn Grange es la “granja de azotea” más grande de los Estados Unidos con una producción orgánica de más de 20,000 kilogramos al año, además de brindar servicios de asesoría, y colaboración con distintas instituciones. (Brooklyn Grange Rooftop Farm, 2005)

Según explicó Ben Flanner, presidente del Brooklyn Grange, en una conferencia para The Garrison Institute, en el 2011, para crear la granja utilizaron un sistema de aligerado de techos verdes del proveedor alemán Optigreen© que consiste de cuatro capas; un fieltro, una capa para el drenaje, una capa de fieltro más grueso y una malla anti raíz. (Flanner, 2011)



Figura 5 Brooklyn Grange, NY (Brooklyn Grange Rooftop Farm, 2005)

En el caso de México, no existe un ejemplo que tenga una producción o infraestructura como el Brooklyn Grange, sin embargo, existen hoy en día instituciones como es la SEDEMA y el gobierno del Distrito Federal que fomentan la generación de este tipo de proyectos, mediante talleres y algunos manuales para que la población empiece a conocer y aprender de este tipo de soluciones. (Secretaria Del Medio Ambiente CDMX , 2017)

Uno de estos ejemplos sería el Centro de Agricultura Urbana Romita, el cual es un huerto urbano demostrativo el cual es operado por Fundación A Cada Uno en colaboración con la Delegación Cuauhtémoc en el Distrito Federal. (Centro de Agricultura Urbana Romita, s.f.)



Figura 6 Huerto Romita, DF (Centro de Agricultura Urbana Romita, s.f.)

2.4 Cultivo biodinámico o biointensivo.

Uno de los métodos de cultivo que se pueden seguir para desarrollar un huerto es el cultivo biodinámico o biointensivo, el cual es una alternativa para producir mayor cantidad de alimentos en un menor espacio y también mejorar el suelo utilizando técnicas sustentables y amigables con el medio ambiente. (Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT, 2013)

Este tipo de sistema, se originó en la década de los setentas por el grupo Ecology Action de John Jeavons, en California, Estados Unidos, y está basado en la utilización de productos locales, sin la necesidad de utilizar maquinaria ni productos comerciales como fertilizantes o insecticidas, para así no perjudicar el bienestar del ambiente y de las personas. (Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT, 2013)

“Con este método es posible obtener mayores rendimientos que con la forma tradicional de cultivo, además de que se enriquece paulatina y sostenidamente el suelo” (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT, 2013)

Un huerto biointensivo requiere seguir 8 principios básicos

1. Preparar la cama de siembra con la doble excavación: Este es el primer y uno de los más importantes puesto que permite la entrada de aire al suelo, además de que ayuda a retener más agua.
2. Hacer composta para abonar el suelo: La composta funciona como abono, el cual permite dar a la tierra los minerales y nutrientes necesarios.
3. Hacer la siembra cercana: Se refiere a que las plantas que se utilizarán en la cama de cultivo deberán de ser sembradas a una distancia más corta que la recomendada por la agricultura tradicional.
4. Asociar y rotar nuestros cultivos: Lo que se busca es sembrar especies que se beneficien entre sí, es importante buscar la vinculación adecuada entre las especies, evitar asociaciones inconvenientes es decir que requieran los mismos nutrientes y aprovechar las propiedades de algunas plantas para proteger el huerto de algunas plagas. En cuanto a la rotación de cultivos, es un principio que se debe de seguir para que el suelo esté protegido por las plantas, lo que se busca es la rotación de las especies vegetales para que el mismo suelo pueda regenerar los nutrientes que han sido absorbidos por las plantas.
5. Cultivo de carbono: Lo que se busca es sembrar plantas que además de alimentarnos a nosotros, produzcan equipo utilizado seco para poder hacer composta.
6. Cultivo de calorías: Se refiere a sembrar plantas que produzcan mucho alimento en poco espacio.
7. Uso de semillas de polinización abierta: Es decir, semillas nativas o criollas que nosotros mismos podamos producir y seguir sembrando siempre.
8. La integralidad del método: Esto significa que estos ocho principios sólo funcionan si los utilizamos todos juntos, uno no sustituye a otro.

(Las Cañadas Centro Agroecológico)

A este documento se anexan los siguientes documentos, de manera digital, los cuales funcionan como una guía más detallada de la aplicación y elaboración de los huertos biointensivos.

El huerto familiar biointensivo Introducción al método de cultivo biointensivo, alternativa para cultivar más alimentos en poco espacio y mejorar el suelo, (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT, 2013)

Manual de Cultivo Biointensivo de Alimentos, (Las Cañadas Centro Agroecológico)

2.5 Estudios térmicos relacionados a los sistemas de cubiertas vegetales

Como se mencionó al inicio del documento, los sistemas de azoteas verdes pueden brindar múltiples beneficios entre ellos, los de carácter térmico múltiples estudios desarrollados en distintas ciudades del mundo avalan lo anterior.

La transferencia térmica a través de un techo verde se determina mediante la interacción del clima con la vegetación y sus demás componentes

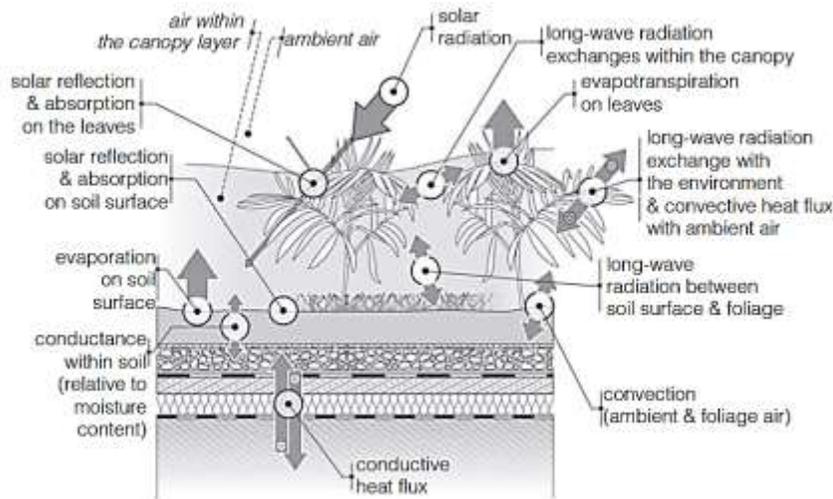


Figura 7. Esquema general del intercambio de calor en un techo verde (La Roche P, 2014)

En el año de 1998 Del Barrio, mediante un análisis matemático analizó el comportamiento térmico de las azoteas verdes, lo cual dio como principal resultado que las azoteas verdes actúan como aislante térmico. (Barrio, 1998)

El mismo año, Eumorfopoulou después de realizar cálculos acerca del comportamiento de una azotea verde concluyó que este puede contribuir al comportamiento térmico del edificio. Este estudio arrojó que del total de la radiación solar que era absorbida por el sistema, un 27% era reflejada mientras que las plantas y el sustrato absorbían el 60%. (Eumorfopoulou, 1998)

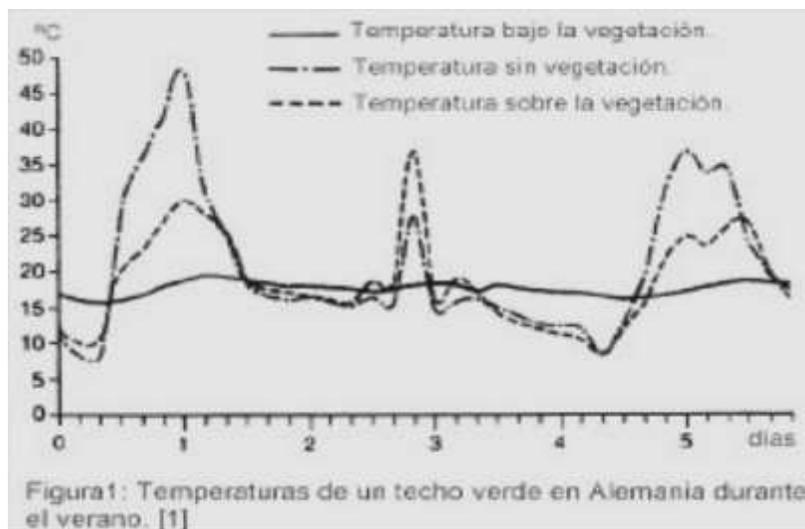
En 1999, Kolb y Shwartz realizaron estudios en Alemania en los cuales se define la aportación térmica de la vegetación en una envolvente.

Se realizaron mediciones tanto en condiciones de tanto de calor como de frio extremo bajo las siguientes condiciones

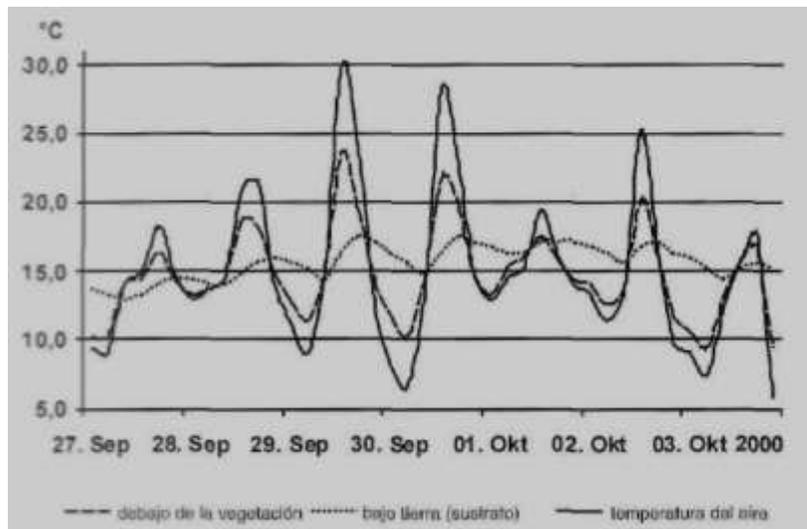
Calor:

En el periodo de calor extremo con temperaturas de 35°C al exterior la temperatura registrada al interior del techo no excedió los 25°C. Kolb y Schwartz identificaron que el efecto refrigerante de las cubiertas verdes es producido principalmente por la evaporación (evapotranspiración), la sombra y la reflexión de las plantas, así como por el consumo de la energía recibida a través de la fotosíntesis y la inercia térmica del agua contenida en sus tejidos. (G., Tectos verdes, planificación, ejecución, consejos prácticos., 2005)

En las gráficas presentadas a continuación, se muestra una medición realizada durante seis días de verano a una profundidad de 10 cm del sustrato del techo verde. Donde se hicieron las mediciones de la temperatura exterior y la interior.



Gráfica 1 Temperaturas de un techo verde en Alemania durante el verano



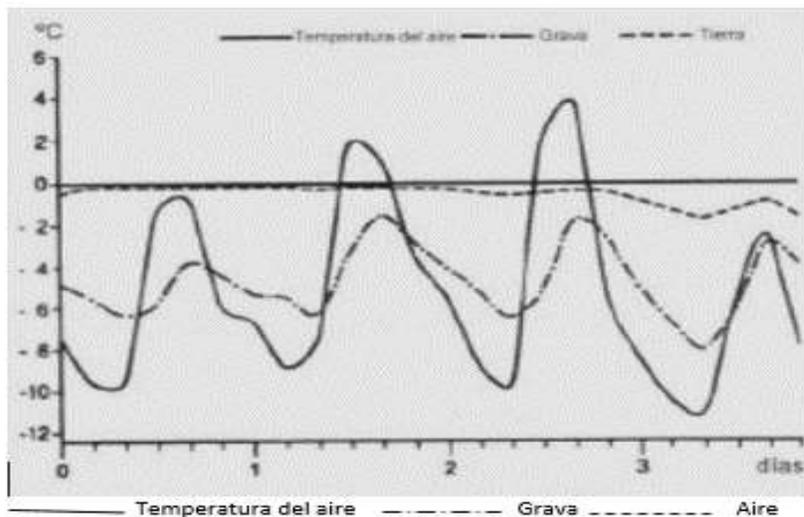
Gráfica 2 Temperaturas de un techo verde en Alemania durante el otoño

En la gráfica 1 se puede observar que mientras que la temperatura media a 10cm de la tierra sin vegetación presento una oscilación de 42°C en el periodo de medición, mientras que, con la misma base, pero con una mayor vegetación se obtuvo una oscilación de 15°C (G., Tecttos verdes, planificación, ejecución, consejos prácticos., 2005)

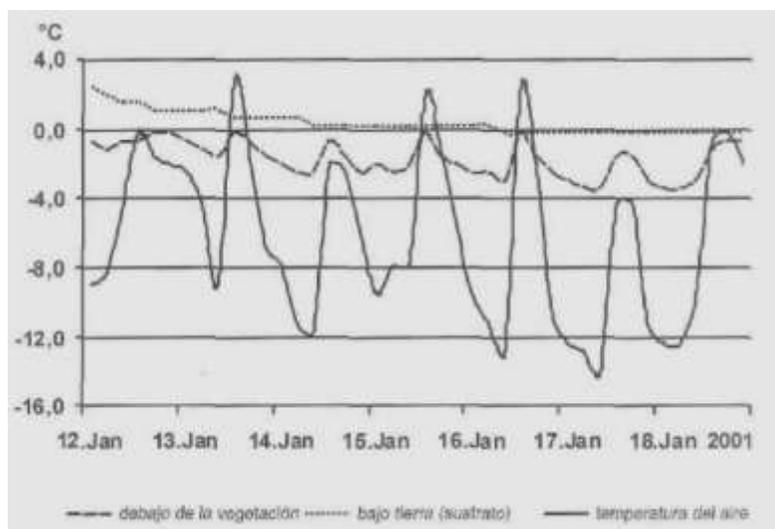
En la gráfica 2 se muestra la medición realizada de un techo verde de 16cm de espesor con una cubierta vegetal de pasto silvestre en un periodo de septiembre y octubre, en esta medición se obtuvo que mientras en el exterior la temperatura era de 30°C debajo de la cubierta era de 17.5°C (G., Tecttos verdes, planificación, ejecución, consejos prácticos., 2005)

Frio:

Para el invierno Kolb y Schwartz realizaron una medición comparativa entre un techo con cubierta vegetal y otro de grava, medidas a una profundidad de 5 cm por un periodo de cuatro días, lo que arrojó como resultados las siguientes gráficas. (G., Tecttos verdes, planificación, ejecución, consejos prácticos., 2005)



Gráfica 3 Temperaturas a una profundidad de 5 cm. en invierno



Gráfica 4 Temperaturas de un techo verde de 16cm. durante el invierno.

En la gráfica 3 se muestra que la temperatura exterior estaba en 11°C la de la tierra era de -2°C y la de la grava -7°C lo que da un diferencial de 9K

Por otra parte, la gráfica 4 nos muestra el comportamiento del mismo techo de 16cm de espesor, donde se registró que cuando la temperatura del aire alcanzaba los -14°C bajo los 16 cm la temperatura era de 0°C a la vez que la temperatura sobre la tierra era de -3°C lo que nos permite ver que la mayor reducción del

diferencial de la temperatura es aportada por la misma vegetación. (G., Tecttos verdes, planificación, ejecución, consejos prácticos., 2005)

Los estudios realizados por Kolb y Schwartz fueron retomados por Minke tiempo después en donde relacionaría el comportamiento térmico de las azoteas verdes con “una piel de oso” (G., Tecttos verdes, planificación, ejecución, consejos prácticos., 2005)

Recientemente estudios realizados en la ciudad de Toronto reportaron que el uso de un sistema de azotea verde se puede ver reflejado en un ahorro de energía puesto que el comportamiento térmico de la azotea reducía el uso de sistemas de climatización para mantenerse dentro de la zona de confort. (Dr. Doug Banting, 2005)

Sumado a lo anterior se comprobó a escala urbana y global para Toronto, que el efecto de isla de calor podía ser reducido en un 25% de manera inmediata y en un 33% anualmente, con el uso de techos verdes (Dr. Doug Banting, 2005)

En años más recientes se han realizado ya estudios adecuados a las condiciones climáticas nacionales, investigadores como Torres y Morillón en el 2007 o el modelo presentado por Ortega, López y Canesco brindan un panorama más adecuado a las condiciones térmicas que un techo verde puede brindar en nuestro país.

En el Centro de Investigaciones en Arquitectura, Urbanismo y Paisaje de la UNAM, Ortega y Morales han desarrollado mediciones de conductividad térmica en muestras de techos verdes mediante el uso de parrillas de resistencia eléctrica las cuales emiten calor radiante a las muestras. (Ortega A, 2012)

Por su parte Carbajal, determinó las propiedades termofísicas de las componentes inertes del arreglo constructivo mediante el uso de un conductímetro de plato caliente. (J., 2009)

Para conocer de manera detallada el comportamiento de algunos arreglos de vegetación ante condiciones de clima específicas, Spolek y Sailor han desarrollado un simulador de ambiente controlado el cual contempla niveles de radiación, temperatura, humedad relativa, lluvia y viento (Sailor D, 2008)

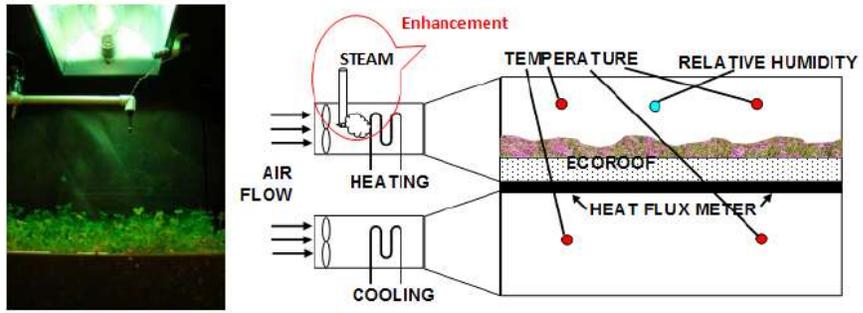


Figura 8 Instalaciones de prueba de techos verdes. Sección de prueba en funcionamiento (a la izquierda); y esquemático con la mejora propuesta para permitir el control de la humedad con inyección directa de vapor

3 Climatología

3.1 Ubicación

El área metropolitana del valle de México, ZMVM, (19° 25' North, 99° 07' W, 2240msnm) se encuentra al interior de la Cuenca del Valle de México, anteriormente ocupada por los antiguos lagos de Texcoco, México y Xochimilco, en la región central del país.

Se encuentra conformada por 16 delegaciones pertenecientes a la CDMX y 60 municipios colindantes, de los cuales uno es perteneciente al estado de Hidalgo mientras que los demás pertenecen al Estado de México, abarcando una superficie de casi 8000 km².

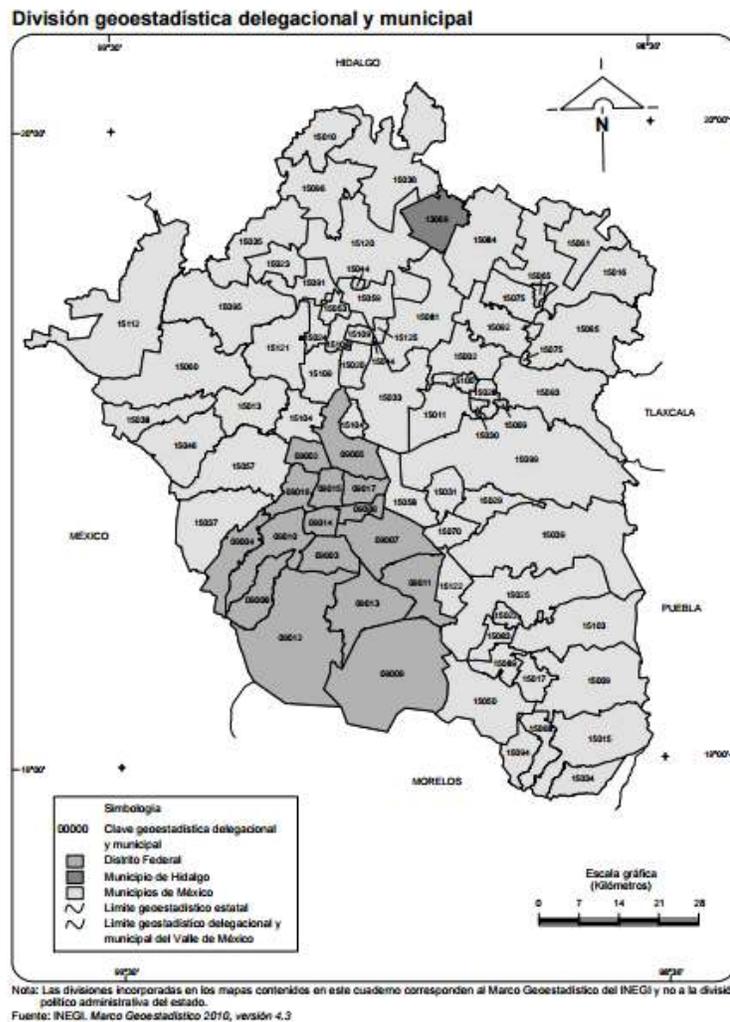


Figura 9 Mapa "División geo estadística delegacional y municipal" INEGI

Según datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI, esta zona contaba con una población aproximada de 20 millones de habitantes, (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI, 2010) siendo clasificada por la ONU como una de las aglomeraciones urbanas más pobladas del mundo. (Notimex El Universal, 2012)

3.2 Clima

Debido a su gran extensión, el ZMVM tiene diferentes características climáticas. De acuerdo a la clasificación Köppen García, la mayoría de las zonas de la ZMVM, tienen un clima templado, Cb (w1 w (i ') g, con días extremos y un promedio diario de oscilación de 13.8°C, con veranos frescos, claros y prolongados, mientras que el invierno es seco.

Las temperaturas más altas se presentan durante el mes de mayo, aunque la temperatura máxima diaria registrada llega hasta los 33°C, mientras que la temperatura mínima promedio es de 9.6°C con algunos picos por debajo de los 0°C (Fuentes, 2004)

El mes con mayor radiación es marzo, con 797 W / m², aunque la media anual es de 665,8 W / m² (Servicio Meteorológico Nacional, SMN , 1941-1997.)

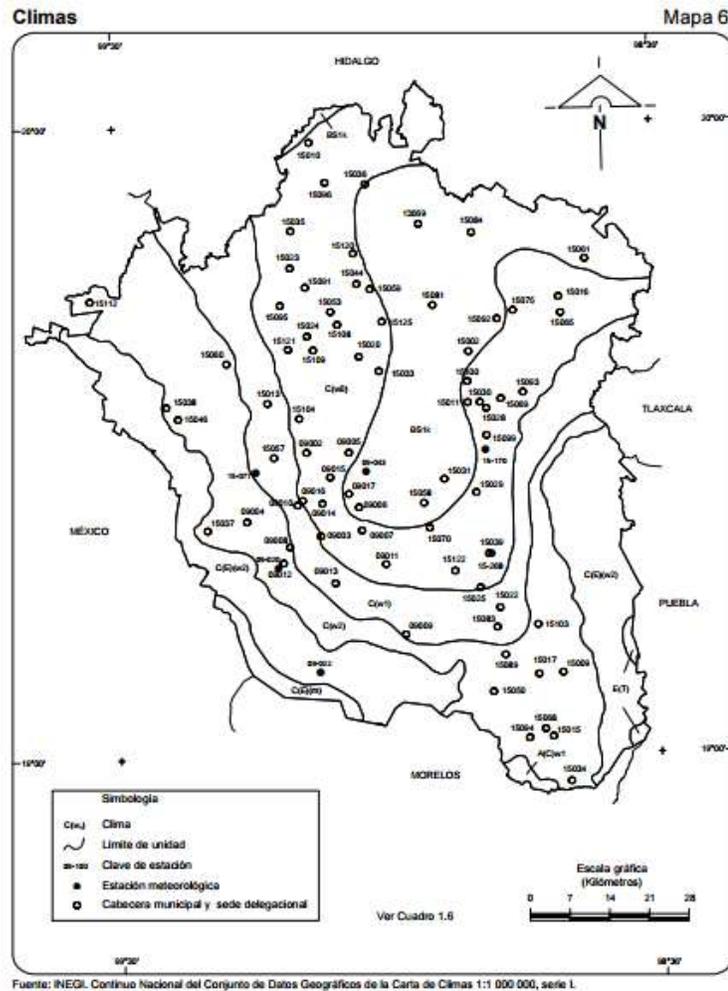


Figura 10 Mapa de climas de la ZMVM INEGI

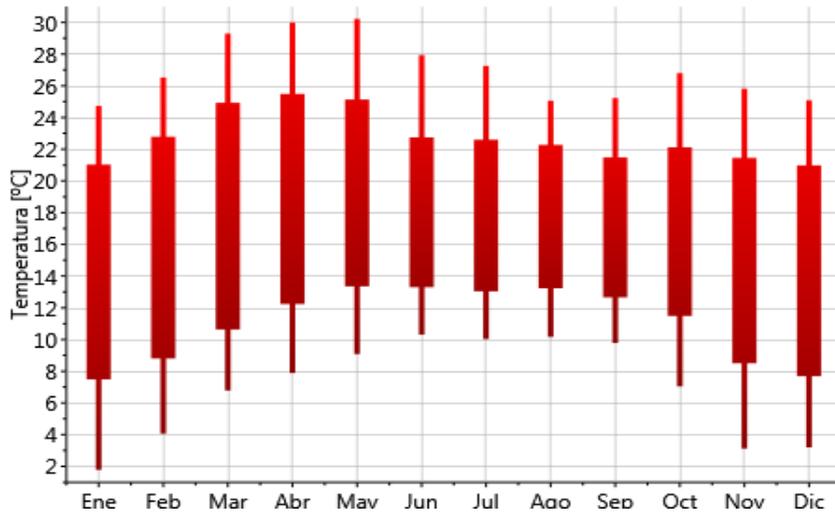
3.3 Caso de estudio

Todas las simulaciones se realizaron tomando como clima el arrojado por la estación meteorológica ubicada en el aeropuerto internacional "Benito Juárez" de la CDMX, con coordenadas 19.43 N y 99.08 W a una altitud de 2234 msnm, esto con el fin de poder realizar una comparación con dos distintos motores de simulación, ENER HABITAR y ENERGY PLUS, bajo las mismas condicionantes climáticas.

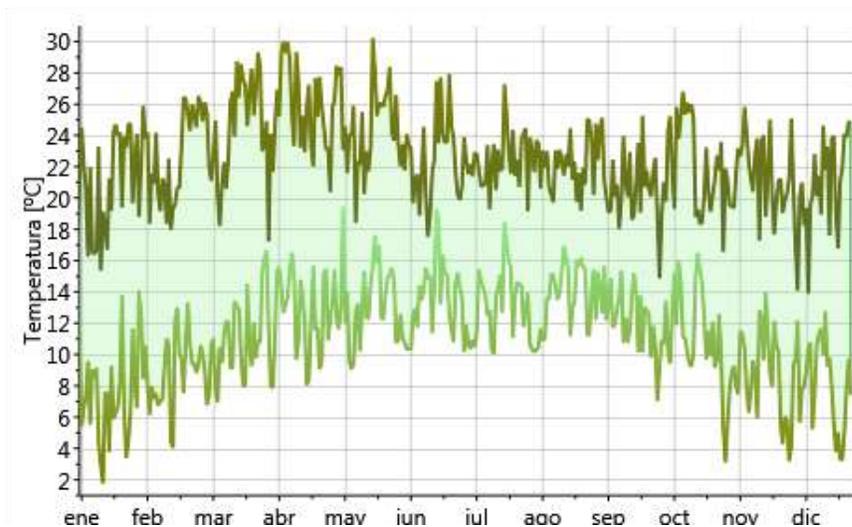
Es importante resaltar que los gráficos que se presentan a continuación fueron generados mediante Meteonorm en su versión 7.0

3.4 Temperatura

Para la presente locación, el periodo más cálido inicia en abril y termina en junio siendo mayo el mes más caluroso, sin embargo, las temperaturas diarias más altas se presentan en el periodo entre mayo y junio, donde la temperatura diaria puede llegar a sobrepasar los 28°C, mientras que el periodo frío se presenta de noviembre a enero siendo el mes más frío es este último, mismo mes en el que se presentan las temperaturas diarias más bajas alcanzando temperaturas por debajo de los 4°C.



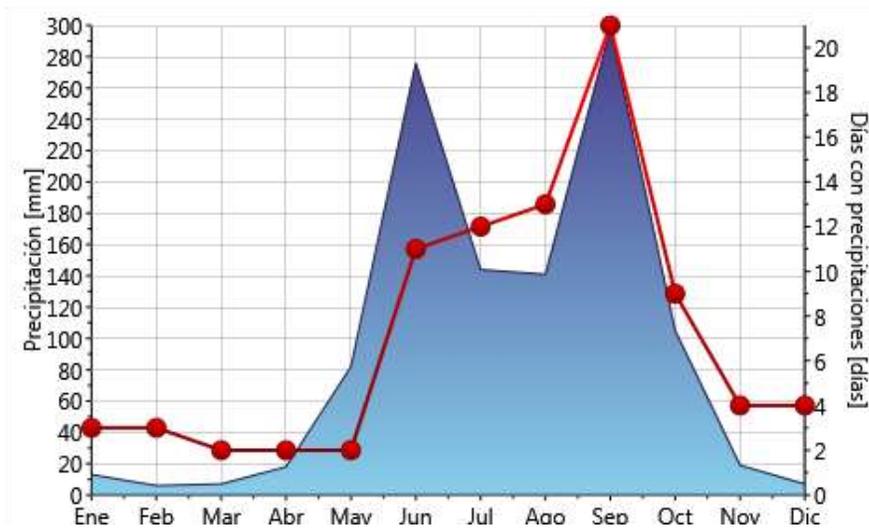
Gráfica 5 Temperatura del aire



Gráfica 6 Temperatura diaria

3.5 Humedad relativa

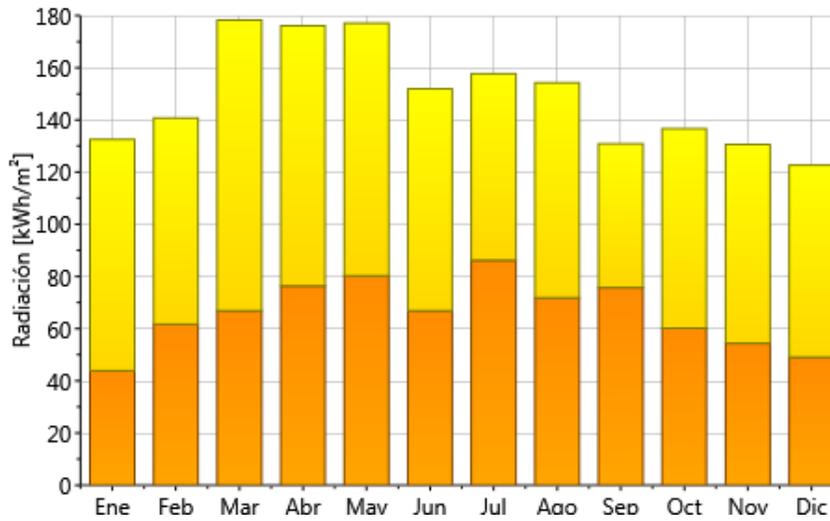
El mes de septiembre es el mes con niveles de humedad relativa más altos con un 66% mientras que el periodo seco corresponde al mes de marzo con tan solo un 34%, siendo el promedio anual del 50%. Lo anterior va directamente relacionado con el periodo de lluvias el cual presenta su pico más alto, durante septiembre y octubre mientras que el periodo de sequía va desde noviembre hasta el mes de abril.



Gráfica 7 Precipitación

3.6 Radiación

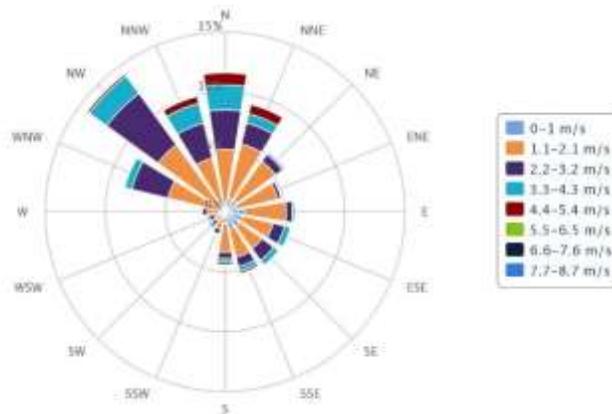
El periodo con mayores niveles de radiación se presenta durante los meses de marzo, abril y mayo con niveles cercanos a los 180 KWh/m², mientras que los niveles de radiación más bajos se presentan durante los meses de noviembre, diciembre y enero con niveles apenas por encima a los 130 KWh/m².



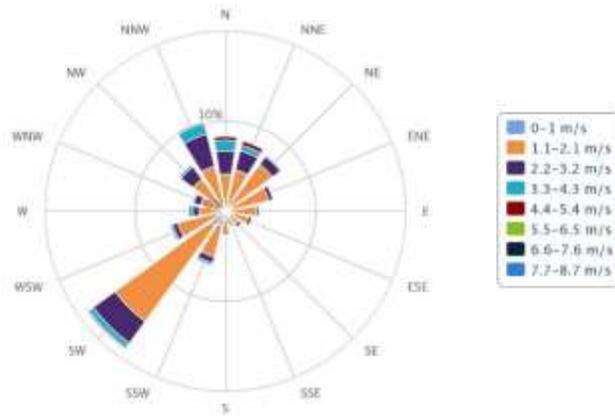
Gráfica 8 Radiación global

3.7 Viento

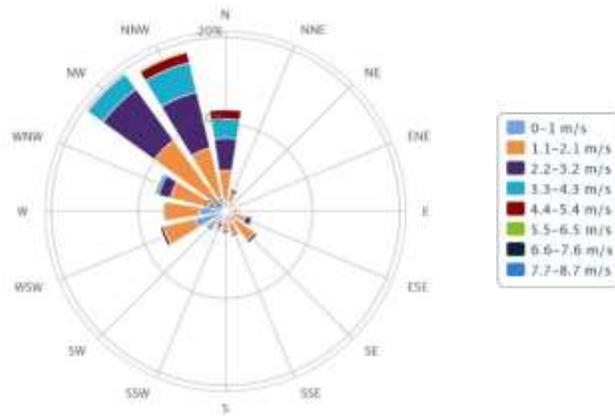
Los vientos dominantes se presentan del norte siendo el periodo de abril y mayo donde se presentan los vientos con mayor velocidad, alcanzando en promedio los 3.2 m/s mientras que el mes que presenta vientos de menor velocidad es diciembre con una velocidad de 2.5 m/s provenientes del este. (Secretaria Del Medio Ambiente, SEDEMA, CDMX, 2017)



Gráfica 9 Rosa de los vientos, estación meteorológica Merced, año 2017 (Secretaria Del Medio Ambiente, SEDEMA, CDMX, 2017)



Gráfica 10 Rosa de los vientos, estación meteorológica Pedregal, año 2017 (Secretaría Del Medio Ambiente, SEDEMA, CDMX, 2017)



Gráfica 11 Rosa de los vientos, estación meteorológica Tlalnepantla, año 2017 (Secretaría Del Medio Ambiente, SEDEMA, CDMX, 2017)

4 Armado de módulos de pruebas

4.1 Selección de vegetación

La azotea verde convencional incluye arreglos vegetales usualmente adecuados a la ornamentación, característica que no evita que este tipo de sistemas brinde múltiples beneficios ambientales y económicos, sin embargo, este tipo de sistemas al requerir un mantenimiento permanente tienden a tener un comportamiento deficitario en el aspecto económico, sin embargo, este tipo de comportamiento puede verse reducido al volver la azotea verde productiva para los usuarios.

Para la selección de cultivos fue necesario tomar en cuenta distintos factores como son; la asociación y rotación de cultivos, cultivos de carbono, cultivos de calorías. Todos estos puntos siguiendo lo indicado en el manual de cultivo biointensivo. (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT, 2013)

Pese a que el octavo principio del método de cultivo biointensivo pide respetar la integridad del método, se decidió seguir únicamente los siguientes puntos

Asociación y rotación de cultivos

La asociación de cultivos se refiere al “convenio” que tienen dos o más especies vegetales para beneficiarse entre sí. Los beneficios que brinda al huerto la asociación de cultivos se pueden ver reflejados la salud, protección física, control de insectos y hierbas dentro de las camas de cultivo.

Mientras que la rotación de cultivo se refiere a que no se debe de sembrar en el mismo lugar dos veces seguidas el mismo cultivo, esto permite que las propiedades del suelo no se agoten además de que permite controlar de mejor manera las plagas en caso de que el cultivo sufra de ellas

Cultivo de carbono

Se refiere a aquellos cultivos que además de brindar su función como alimentos, estos brindan suficiente materia para poder ser utilizados en la elaboración de composta. Los cultivos de carbón tienen la capacidad de aprovechar la energía del sol y el dióxido de carbono para transformarlo en suelo.

Cultivo de calorías

Se refiere a aquellos cultivos que son capaces de producir mucho alimento en poco espacio, lo anterior va de la mano con la idea de que el huerto únicamente funciona como un complemento a la dieta familiar, sin embargo, una pequeña superficie de terreno puede brindar suficiente alimento para alimentar a una familia.

(Las Cañadas Centro Agroecológico)

Sumado a los aspectos anteriores también se consideraron; la adecuación del huerto al usuario, y la fisionomía de la planta, recordando que el objetivo principal de la presente investigación es el de generar una azotea verde que brinde beneficios térmicos al interior de un espacio.

Adecuación al usuario

Como su nombre lo indica, el huerto debe de contener especies que sean parte de la dieta cotidiana de los usuarios, y que puedan ser cultivados en las condiciones en las que se encuentra la azotea que se planea utilizar para el huerto, es decir, si únicamente se cuenta con un sustrato con espesor de 10cm no podemos esperar que se puedan cultivar árboles frutales.

Características fisionómicas de la vegetación para un comportamiento térmicamente eficiente en un sistema de azotea verde

Siguiendo lo establecido por Gernor Minke, la cubierta vegetal en una azotea verde debe de trabajar como “el pelaje de un oso”. Lo anterior se refiere a que una capa densa de vegetación presenta efectos positivos en el comportamiento térmico en los sistemas de azoteas verdes.

(Edwin Israel Tovar Jimenez, Anibal Figueroa Castrejon, Manuel Gordon Sanchez, 2013)

Algunos estudios que demostraron lo anterior son:

Tabares-Velasco reconocieron la contribución que brinda la cobertura vegetal, al compararla contra una capa expuesta de sustrato (P., 2012)

Palomo del Barrio determinó como es que el índice de área foliar, LAI por sus siglas en inglés, así como las características geométricas del follaje, determinan la transferencia térmica relacionada a la radiación de onda larga y corta. (Barrio, 1998)

Estudios realizados en Toronto, Canadá, por Kolb, Schwarts y Doug, mostraron que una cobertura densa de pasto provee un buen comportamiento térmico tanto en periodos cálidos y fríos. (G., Tectos verdes, planificación, ejecución, consejos prácticos, 2005)

Por lo anterior se buscó vegetación que, al armar las charolas de cultivo, el follaje de esta formara una cubierta densa, la cual evitara que hubiera áreas expuestas de sustrato expuestas directamente a radiación solar.

4.2 Especies seleccionadas

Dedo de niño

Nombre científico: *sedum rubrotinctum*

Genero sedum

Fotografía



Lechuga

Nombre científico: *lactuca sativa*

Género: lactuca

Fotografía



Acelga

Nombre científico: *beta vulgaris*

Género: *beta*

Fotografía



Cebolla cambray

Nombre científico: *allium fistulosum*

Género: *allium*

Fotografía



Yerbabuena

Nombre científico: *mentha spicata*

Género: *mentha*

Fotografía



Manzanilla

Nombre científico: *chamaemelum nobile*

Género: *chamaemelum*

Fotografía



4.3 Selección de sustrato

La capa de sustrato es aquella mezcla de suelo preparado sobre la cual se desarrolla la vegetación, es de esta misma de la cual la planta obtiene sus nutrientes y es el mismo sustrato el que puede limitar el crecimiento de esta. (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2011)

La siguiente es la metodología utilizada realizada en las mediciones correspondientes a sustratos utilizados en las camas de cultivo de las cuales se busca obtener:

- Pesos
- Tipo de suelo y sus componentes
- Capacidad de campo
- Punto de marchitez

Las pruebas se realizaron en las instalaciones del laboratorio de arquitectura bioclimática dentro de la UAM Azc.

La FAO denomina a la Capacidad de Campo (CC) como a la cantidad de agua que el suelo es capaz de retener luego de ser saturado y dejado drenar libremente, mientras que el Punto de Marchitez (Pm) se refiere al contenido de agua de un suelo que ha perdido toda su agua a causa del cultivo y, por lo tanto, el agua que permanece en el suelo no está disponible para el mismo (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO, s.f.)

Estas condicionantes son de gran importancia para los cultivos puesto que nos permite conocer si el tipo de sustrato que se utiliza es el adecuado para el tipo de cosecha que se plantea, así como nos permite determinar momentos óptimos de riego y su magnitud

Para esta investigación se ha decidido utilizar una mezcla de tierra negra y materia orgánica, la cual será comparada con otros dos tipos de sustratos (Agrolita, mezcla de tierra negra con tepojal) para determinar cuál de las tres opciones tiene una mayor capacidad de campo.

4.3.1 Equipo utilizado

- Sustrato: Mezcla 1 (tierra negra con materia orgánica)
- Charola de cultivo: 31.5cm X 48 cm X 15cm
- Basculas: Se utilizarán dos modelos de basculas
 - Modelo 1: Braunker modelo YP200
 - Modelo 2: Justa modelo XK3101-PJ
- Equipo de medición especializados
 - Sensor inteligente de humedad de suelo (especificaciones) s-s-mc-m005
 - Estación meteorológica HOBO
- Software especializado HOBOWare
- Cámara fotográfica

4.3.2 Procedimiento utilizado para realizar la experimentación

Determinar la composición del suelo

Se determinó la composición del suelo a analizar en base a los procedimientos indicados por la FAO, para lo cual se utilizó la “prueba de la botella” la cual consiste en colocar en un embace transparente, aproximadamente 5 cm del sustrato del cual se quieren saber sus proporciones, y llenar el frasco con agua, agitar y dejar reposar para que los elementos se sedimenten.

La capa de arena será aquella que se encuentre hasta el fondo de la botella posteriormente una capa de limo y en la parte superior se sedimenta la arcilla contenida en el suelo. En caso de que a simple vista no sea posible determinar que es cada uno de los elementos se deben de separar cada uno de los elementos y realizar una pequeña prueba de compresión.

Es importante mencionar que la Agrolita y el tepojal no se determinan del mismo modo puesto que obedecen el mismo comportamiento

En el caso de la mezcla 1 para realizar las pruebas se utilizó un frasco de cristal con tapa de 9.5cm de alto y se colocaron dentro 3.5 cm del sustrato

Determinar el tipo de suelo

Para determinar el tipo de suelo es necesario determinar las proporciones de los componentes antes obtenidos, una vez obtenidos estas proporciones, utilizando el Triángulo de texturas USDA se puede determinar qué tipo de suelo se tiene

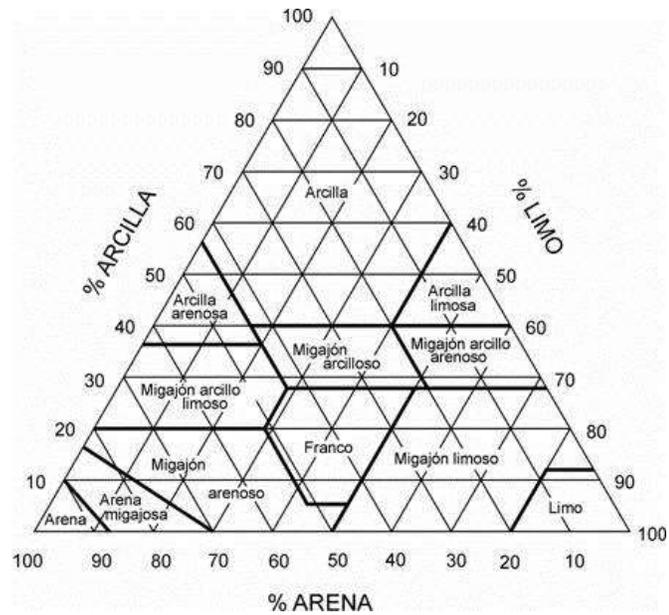


Figura 11 Caracterización física del suelo (civil geeks)

Tabla de capacidad de campo y punto de marchitez

Habiendo determinado el tipo de suelo se puede ya tener un estimado del punto de marchitez y la capacidad de campo del mismo mediante las siguientes tablas

HUMEDAD EN EL SUELO			
Textura del suelo	Capacidad del campo	Punto de marchitamiento	Humedad disponible
Arenoso	9%	2%	7%
Arenoso – franco	14%	4%	10%
Franco arenoso – limoso	23%	9%	14%
Franco arenoso + materia orgánica	29%	10%	19%
Franco	34%	12%	22%
Franco – arcilloso	30%	16%	14%
Arcilloso	38%	34%	14%
Arcilloso con buena estructura	50%	30%	20%

Figura 12 Tabla comparativa de capacidad de campo y punto de marchitez de la empresa Traxco

Tipo de Suelo	$\theta_{FC} (m^3/m^3)$
Arena	0.07 – 0.17
Arena margosa	0.11 – 0.19
Marga arenosa	0.18 – 0.28
Marga	0.20 – 0.30
Marga limosa	0.22 – 0.36
Limo	0.28 – 0.36
Arcilla limosa	0.30 – 0.42
Arcilla	0.32 – 0.40

Figura 13 Capacidad de Campo para diferentes tipos de suelos (FAO, 1998)

Tipo de Suelo	$\theta_{wp} (m^3/m^3)$
Arena	0.02 – 0.07
Arena margosa	0.03 – 0.10
Marga arenosa	0.06 – 0.16
Marga	0.07 – 0.17
Marga limosa	0.09 – 0.21
Limo	0.12 – 0.22
Arcilla limosa	0.17 – 0.29
Arcilla	0.20 – 0.24

Figura 14 Punto de marchitez para diferentes tipos de suelos (FAO, 1998)

4.3.3 Mediciones de peso en distintas condiciones de humedad

El segundo método que se utilizó para determinar la capacidad de campo y el punto de marchitez consistió en pesar cada uno de los elementos que conforman la charola de cultivo, sin la vegetación, y posterior a un periodo de 24 horas, es importante que previo a realizar estas mediciones las charolas que se utilicen estén previamente perforadas para permitir el libre dren del agua.

Una vez preparadas las charolas se dispone a pesar cada elemento por separado para así obtener únicamente las variaciones de peso sobre el sustrato, posterior a esto se coloca la cantidad utilizada por cada arreglo y se pesa nuevamente.

Ya con el sustrato a la altura determinada se empieza a regar el suelo hasta que este empiece a drenar de manera constante, a partir de ese momento se cuentan las 24 horas

Es de suma importancia que al mismo tiempo que se realicen las mediciones tanto en condiciones a capacidad de campo como en el estado original del sustrato se deben de tomar mediciones con el sensor de humedad y la estación meteorológica HOBO para esto es necesario calibrar el sensor. Antes de realizar las mediciones de pesos se calibro el sensor de humedad mediante colocar el mismo dentro de un recipiente con agua destilada y en exposición directa al aire. Según los parámetros establecidos por el fabricante el rango en el que debe de mostrar:

Aire: -0.193 a -0.139

Agua destilada +0.521 a +0.557

4.3.4 Resultados

Prueba No.1 Composición del suelo

No se realizó esta prueba en la mezcla 2 y 3 debido a que por el tipo de componentes que conforman las mezclas, no es aplicable esta prueba.

La muestra que se utilizó es de 3.1cm de altura correspondiente a la mezcla 1 cuyos componentes son tierra negra y materia orgánica. La muestra se dejó en reposo por un periodo de 24 horas después de haber sido agitada, una vez que los componentes del sustrato se asentaron los resultados fueron:

Componente	Altura (cm)	Porcentaje
Mezcla 1	3.1	100%
Arcilla	0.1	3.22
Limo	1.4	45.16
Arena	1.6	51.61

Tabla 2 Porcentaje de componentes de la muestra del sustrato (mezcla1)



Figura 15 Muestra de sustrato mezcla 1 después de 3hrs



Figura 16 Muestra de sustrato mezcla 1 después de 24hrs

Prueba No.2 Composición del suelo

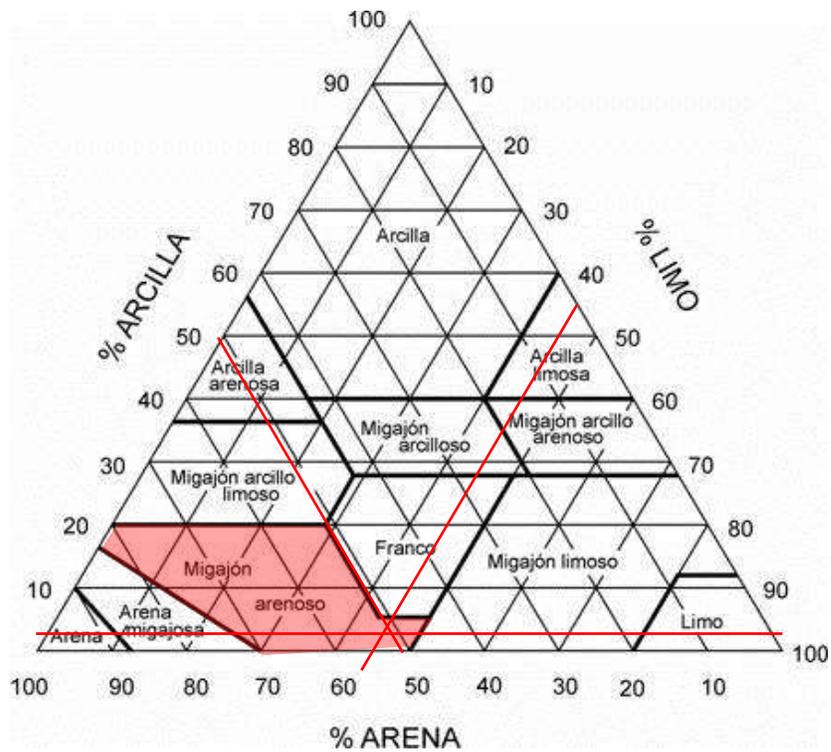


Figura 17 Resultado de acuerdo a pruebas de la FAO

De acuerdo a la proporción de los componentes del sustrato con el que se realizó la prueba el tipo de suelo es migajón arenoso o franco arenoso con materia orgánica

Prueba No.3 Composición del suelo

Tipo de Suelo	θ_{FC} (m^3/m^3)	Tipo de Suelo	θ_{WP} (m^3/m^3)
Arena	0.07 – 0.17	Arena	0.02 – 0.07
Arena margosa	0.11 – 0.19	Arena margosa	0.03 – 0.10
Marga arenosa	0.18 – 0.28	Marga arenosa	0.06 – 0.16
Marga	0.20 – 0.30	Marga	0.07 – 0.17
Marga limosa	0.22 – 0.36	Marga limosa	0.09 – 0.21
Limo	0.28 – 0.36	Limo	0.12 – 0.22
Arcilla limosa	0.30 – 0.42	Arcilla limosa	0.17 – 0.29
Arcilla	0.32 – 0.40	Arcilla	0.20 – 0.24

HUMEDAD EN EL SUELO			
Textura del suelo	Capacidad del campo	Punto de marchitamiento	Humedad disponible
Arenoso	9%	2%	7%
Arenoso – franco	14%	4%	10%
Franco arenoso – limoso	23%	9%	14%
Franco arenoso + materia organica	29%	10%	19%
Franco	34%	12%	22%
Franco – arcilloso	30%	16%	14%
Arcilloso	38%	34%	14%
Arcilloso con buena estructura	50%	30%	20%

Las tablas anteriores funcionan como paramento para comparar los resultados arrojados con el método matemático

Prueba No.4 Composición del suelo

Calibración de sensor de humedad

Equipo utilizado:

- Aire -0.1900
- Agua destilada 0.523
- Capas del sistema utilizado
- Charolas de plástico de 31.5cm X 48 cm X 15cm
- Papel filtro
- Mezcla de sustrato (14cm)
- Pesos iniciales
 - Peso inicial charola 2.57kg
 - Peso inicial charola con tierra 14.28 kg
 - Peso inicial del sustrato 11.71kg
- Mediciones con sensor de humedad en 5 puntos del sustrato
 - 0.115
 - 0.0577
 - 0.1303
 - 0.0787
 - 0.0686
- Pesos del sistema sobresaturado de agua (14l)
 - Peso inicial del sistema 19.84kg
 - Peso del sustrato 17.27kg
 - Peso del sistema después de periodo de 24 hrs de libre dren
 - Peso del sistema 20.77kg
 - Peso del sustrato 18.2kg
- Mediciones con sensor de humedad en 5 puntos del sustrato
 - 0.3395

- 0.3279
- 0.2618
- 0.3729
- 0.3809

Calculo del contenido de agua a capacidad de campo

HP% CC= (Peso Fresco a CC- Peso Suelo Seco) / Peso Suelo Seco*100

HP% CC = (18.2-14.28) /14.28*100

HP% CC= 27.45

Calculo del contenido de agua a Punto de Marchitez PMP

HP% PMP= HP% CC*.74 - 5

HP% PMP= 27.45*.74 - 5

HP% PMP= 15.31

Pese a que los porcentajes no fueron exactamente los mismos de las tablas se debe considerar que la composición de cada sustrato es diferente, las tablas funcionan como un parámetro base el cual permite tener una referencia en situaciones donde no se cuenta con el equipo de medición necesario.

4.4 Armado de charolas de cultivo

Para tener un mayor control en el manejo de las especies a utilizar se optó por utilizar un sistema modular basado en charolas de cultivo, agrupando las especies vegetales de acuerdo a elementos en común. Un sistema modular permite que las charolas puedan ser fácilmente transportadas, que cumplan con una medida estandarizada, que pudieran ser adaptadas a las condiciones mencionadas por el manual de cultivo biointensivo, que permitieran el desarrollo adecuado de la vegetación en el periodo en el que no se realizara ninguna prueba

4.4.1 Equipo utilizado:

- Charolas de plástico de 31.5cm X 48 cm X 15cm
- Especies vegetales a analizar
- Taladro

- Broca
- Sustrato (mezcla de tierra negra y materia orgánica)

4.4.2 Procedimiento utilizado para realizar la experimentación

Se formaron 3 distintos grupos vegetales, basados en las características que comparte cada especie seleccionada, cada charola incluye miembros del mismo grupo, los grupos fueron:

Grupo 1 “hierbas”: manzanilla / yerbabuena

Grupo 2 “hortalizas”: lechuga / acelga / cebollín

Grupo 3 Suculentas: dedo de niño

4.4.3 Preparación de las charolas:

Filtrado del agua: Para evitar estancamiento del agua al momento del riego de las charolas y con esto evitar dañar la vegetación, se perforo la base de las charolas plásticas con la ayuda de un taladro eléctrico y una broca para madera (medida). Lo anterior permite la libre filtración del agua a través del sustrato. Después de realizar la perforación se deben de limpiar los orificios y retirar cualquier residuo plástico restante

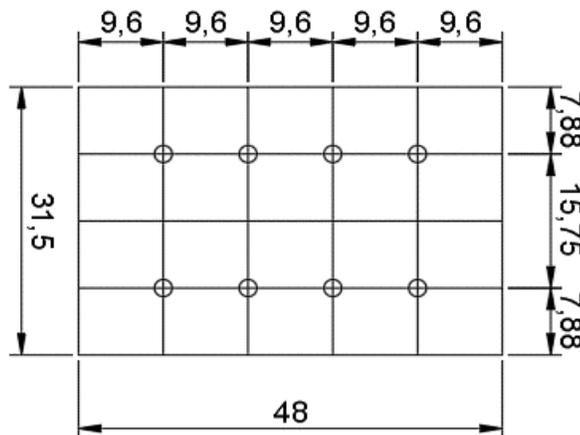


Figura 18 Distribución de perforaciones en charolas de cultivo

Sustrato: Para el sustrato, se estandarizo la altura que este debía de tener a 10cm, espacio suficiente para que la raíz y la base de la planta no sufrieran ningún daño al momento de ser trasplantadas. Es importante mencionar que esta altura se conserva durante todas las pruebas realizadas y que no es la altura recomendada por el manual de cultivo biointensivo.

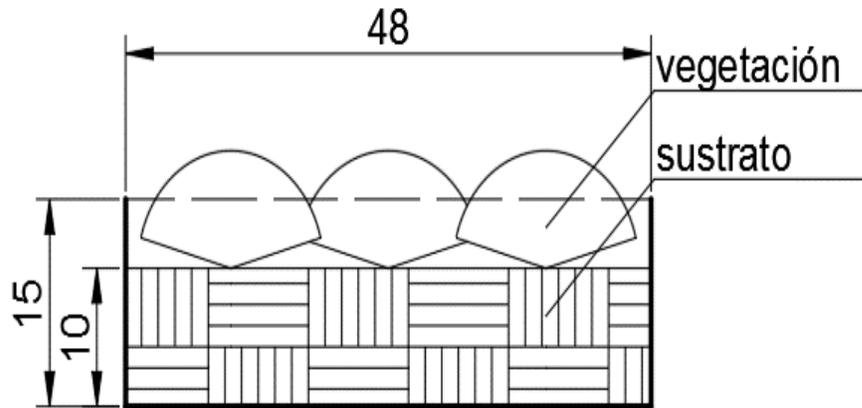


Figura 19 Altura del sustrato en charolas para pruebas

Distribución: Al momento de trasplantar cada individuo a las charolas de cultivo se siguió el acomodo propuesto en el manual de cultivo biointensivo lo que permite plantar un mayor número de sujetos por charola

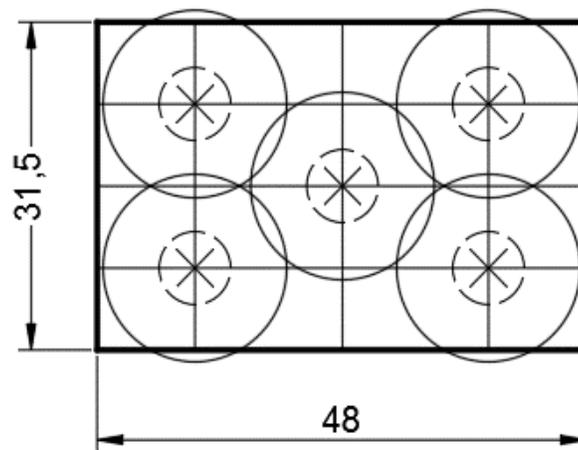


Figura 20 Distribución de vegetación de acuerdo a método biointensivo

5 Determinación de conductancia promedio de tres arreglos de vegetación

5.1 Pruebas en conductímetro

El procedimiento consiste en exponer, durante un periodo de 24 hora, un volumen del sustrato, entre dos placas metálicas, una de ellas, la base, se debe de calentar mediante una resistencia térmica mientras que la placa superior debe de mantenerse fría para que la transferencia térmica se pueda dar, lo anterior es realizado en un contenedor aislado térmicamente y es monitoreado mediante termopares

5.1.1 Conductímetro térmico (laboratorio de energía solar, UAM Azc.)

El conductímetro térmico es un aparato diseñado para medir el flujo de calor que atraviesa una muestra de un m² de un sistema constructivo, esto con el propósito de obtener sus condiciones de estado permanente y así determinar su coeficiente de conductancia promedio.

Debido al alto costo de estos equipos, en el laboratorio de energía solar de la UAM Azc, se encuentra un equipo calibrado con equipo utilizados de construcción modular avalados por la norma NOM-018-ENER-2011

El equipo opera bajo una instalación eléctrica de 110V, su potencia nominal es cercana a los 2400W y su intensidad es de 25 amperio. Además de lo anterior el aparato utiliza módulos análogos ADAM, conectados a una interfaz a un ordenador del laboratorio, el cual, por medio de un software creado en LabView recolecta las temperaturas registradas por termopares los cuales se repartidos en 10 puntos de las dos placas (fría y caliente) que se encuentran en contacto con la muestra.

5.1.2 Equipo utilizado:

- Conductímetro térmico (laboratorio de energía solar)
- Termopares
- LabView
- Sustrato (mezcla de tierra negra y materia orgánica)
- Cámara fotográfica
- Dos congeladores eléctricos
- Bolsas de gel

5.1.3 Procedimiento utilizado para realizar la experimentación

Para poder realizar la prueba de manera adecuada, es importante que el sustrato que se va a analizar se encuentre en punto de marchitez, por lo que fue necesario primero secar el suelo que se utilizó antes de realizar la prueba.

El conductímetro del laboratorio de energía solar está formado por dos placas:

Una caliente, la base, la cual aumenta de temperatura mediante una resistencia eléctrica, la cual arroja impulsos eléctricos hasta que la temperatura de la plancha metálica sea la seleccionada, lo anterior es determinado mediante un termómetro electrónico el cual apaga la resistencia una vez alcanzada la temperatura programada.

La placa superior o placa fría es una cubierta formada por una hoja metálica sobre la cual se deben de colocar bolsas de gel congeladas, esto para permitir que exista una diferencia térmica entre las dos placas y propiciar un intercambio térmico más rápido.

Ambas placas cuentan con 6 termopares funcionales los cuales permiten registrar el cambio de temperatura en el sustrato, y cuentan con un recubrimiento aislante para evitar pérdidas de calor hacia el ambiente.

Una vez seco el sustrato, se colocó sobre la placa caliente una capa uniforme de 10cm de espesor, cuidando que ningún termopar se moviera o desconectara, se montó la placa fría junto con las bolsas de gel congeladas.

Ya colocadas las dos placas se aisló térmicamente los elementos mediante una placa de unicel de 5cm de grosor sobre las bolsas de gel y al frente se colocó una compuerta de madera cuidando no dañar ninguna de las conexiones de los sensores.

El controlador se programó para emitir una temperatura de 60°C y se sincronizó el programa de captura de datos de cada placa para iniciar al mismo tiempo las mediciones en intervalos de 5 minutos, por un periodo de 24 horas.

Finalizado el periodo de 24 horas se detuvo la medición de los termopares, se desconectó la resistencia, se retiraron las cubiertas aislantes junto con las bolsas de gel, mismas que se deben de volver a colocar en los congeladores para pruebas subsecuentes.

5.1.4 Resultados

Placa caliente

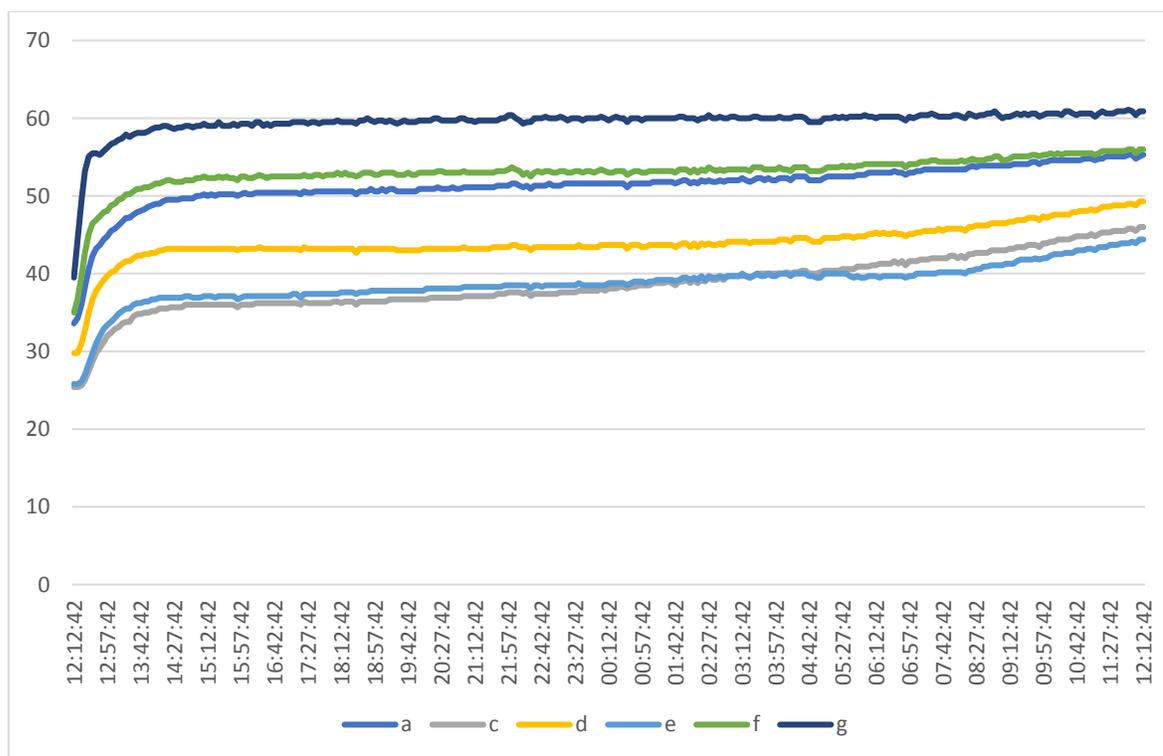
La placa caliente registró las siguientes temperaturas al inicio y al final de la prueba

Prueba iniciada el 10/10/2016 12:12pm

Prueba finalizada el 11/10/2016 12:12pm

a	c	d	e	f	g
33.6	25.4	29.8	25.8	35	39.5
55.33	46	49.3	44.4	56	60.9

Tabla 3 Comparativo de las temperaturas registradas por los termopares al inicio y final de la prueba (placa caliente)



Gráfica 12 Comportamiento térmico placa caliente durante la prueba en conductímetro

Placa fría

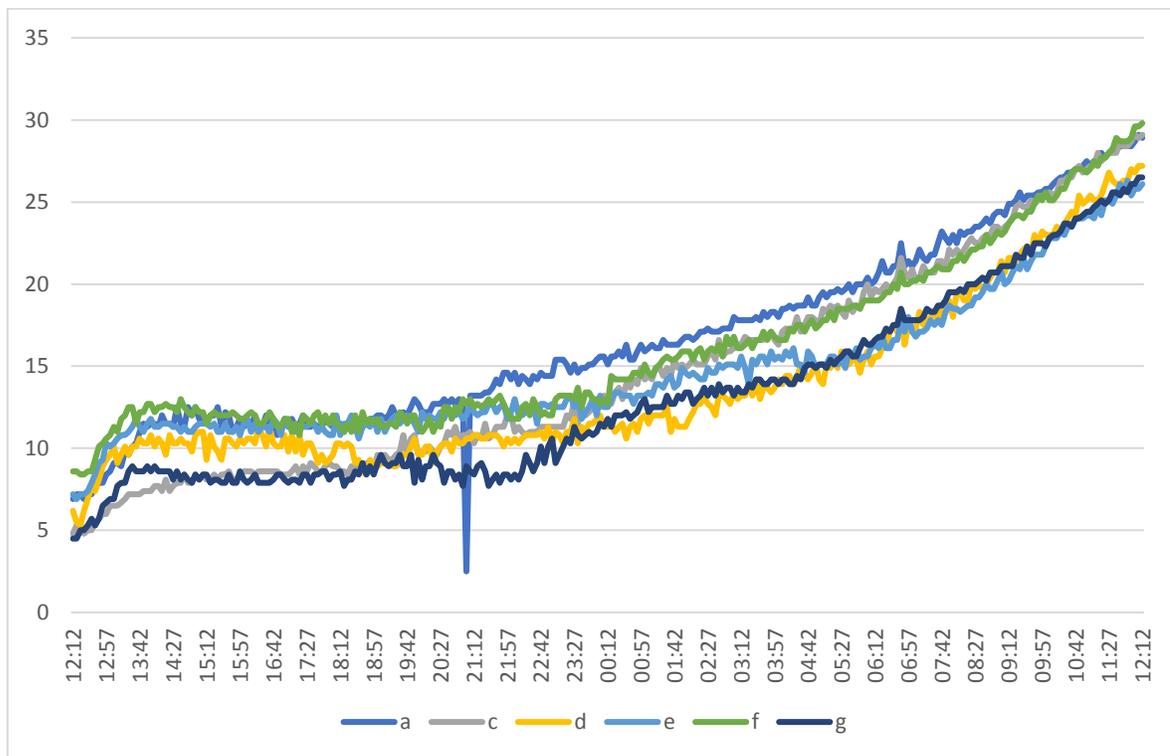
La placa fría registró las siguientes temperaturas al inicio y al final de la prueba

Prueba iniciada el 10/10/2016 12:12pm

Prueba finalizada el 11/10/2016 12:12pm

a	c	d	e	f	g
6.9	4.8	6.2	7.2	8.6	4.5
28.9	29.1	27.2	26.1	29.8	26.5

Tabla 4 Comparativo de las temperaturas registradas por los termopares al inicio y final de la prueba (placa fría)



Gráfica 13 Comportamiento térmico placa fría durante la prueba en conductímetro

5.2 Pruebas en simulador de radiación solar

El siguiente es el procedimiento seguido durante las pruebas realizadas en el simulador de radiación solar, ubicado en las instalaciones de la UAM Azc. el cual es principalmente utilizado en la evaluación de equipos y sistemas solares como estufas y concentradores de calor de proceso. Dicho equipo, permite a los usuarios, simular el espectro solar durante periodos prolongados de tiempo en condiciones de ambiente controlado, ya que el equipo brinda un flujo de calor uniforme.

El simulador está formado por una estructura tubular de dimensiones 1.7m X 1.0m y 2.0m de alto el cual permite realizar ajustes, de manera manual, en los tres ejes geométricos. Originalmente el simulador cuenta con cuatro lámparas infrarrojas General Electrics de uso industrial de 375w, cada una instalada en un luminario con base ajustable el cual permite modificar el ángulo y lugar de las lámparas.

Es importante mencionar que el objetivo principal del simulador es la de semejar las condiciones térmicas del espectro solar, lo anterior tipificado de acuerdo a los requisitos de equipos solares ahí estudiados. Por lo que fue necesario realizar adecuaciones en el simulador para que se pudieran realizar pruebas con sistemas que involucran vegetación.

5.2.1 Radiación PAR en la vegetación

Existen distintos tipos de radiaciones electromagnéticas incidentes en la tierra, cada uno con distintas características y longitudes de onda, el ojo humano únicamente puede percibir la radiación visible o luz, cuya longitud de onda comprende entre los 380nm que corresponde al color violeta y los 780nm que corresponde al rojo. (Hortilux, 2010)

Sin embargo, las plantas perciben de manera distinta la luz al ojo humano, las plantas son sensible en un 57% al componente azul del espectro mientras que en el componente rojo del espectro su sensibilidad es del 100% lo que genera una gran actividad fotosintética. Un manejo incorrecto de la luz en los arreglos vegetales, ya sea por falta o exceso de la misma. puede derivar en estrés y deterioro en la salud de las plantas (Inda-Gro. USA, 2010)

La luz PAR (Photosynthetically Active Radiation), es la cantidad de radiación, dentro de un rango de longitudes de onda, que produce actividad fotosintética en una planta. El rango de las longitudes se encuentra entre los 400 y los 700 nanómetros (Ciencia y Biología, 2010)

5.2.2 Calibración del simulador para obtención PAR

Debido a que el simulador de radiación de la UAM busca replicar el aspecto térmico que se obtiene con la radiación solar fue necesario realizar ajustes al mismo para reproducir de manera más fiel las condiciones a las que la vegetación está expuesta en una cubierta vegetal, por lo que fue necesario modificar los luminarios existentes en el equipo.

Para esto fue necesario realizar ajustes con diferentes tipos de luminarias con el objetivo en cada prueba de buscar una distribución uniforme de la intensidad de luz en el área de medición y que a su vez los niveles de radiación PAR sean los adecuados.

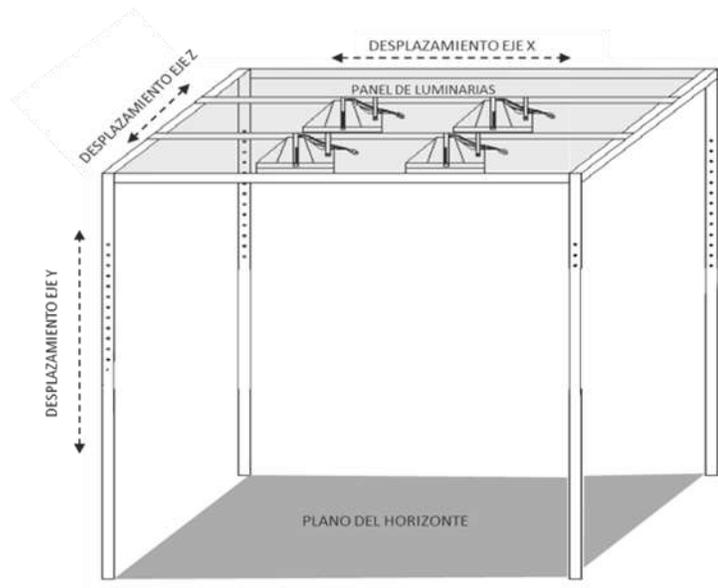


Figura 21 Esquema del simulador de radiación solar de la UAM Azc

A continuación, se presentan dos tablas, la primera representa los niveles obtenidos en la primer prueba, en donde la única variante fue la separación de los luminarios con la matriz de puntos, la segunda muestra los niveles obtenidos al utilizar un arreglo mixto entre los lamparas halógenas la adición de lamparas fluorescentes

HOBO-U30	Unidades	Separación 40cm	Separación 30cm	Separación 20cm
Radiación global	W/m ²	471.9	529.4	618.1
PAR	μE	206.2	253.7	288.7

Tabla 5 Prueba 1 con reflectores infrarrojos de 375 W

HOBO-U30	Unidades	Halógena + 1 Fluorescente	Halógena + 2 Fluorescentes	Halógena + 3 Fluorescentes	Halógena + 4 Fluorescentes	Halógena + 4 fluorescentes en vertical
Radiación global	W/m ²	345.6	309	314	306.9	360
PAR	μE	186.2	196.2	203	206.2	606

Tabla 6 Comparativa de niveles de radiación global y radiación PAR

Para verificar la homogeneidad del flujo luminoso se utilizó el efecto de colores falsos con una cámara digital para así poder ajustar la posición de los reflectores, del mismo modo fue necesario colocar en el respaldo interior de la carcasa un forro especular de aluminio, lo que permitió una adecuada reflexión y distribución de los conos de luz, aportando una distribución uniforme sobre la superficie de prueba

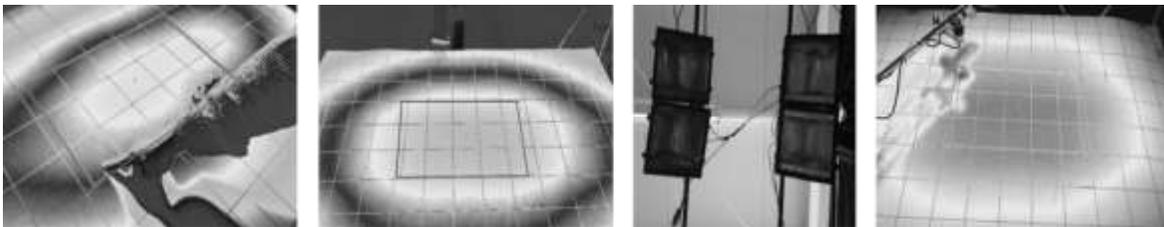


Figura 22 Imágenes tomadas con colores falsos que muestran uniformidad en el área de interés

De acuerdo a la pruebas anteriores se determinó utilizar en vez de reflectores infrarrojos de 375 W, luminarios utilizados actualmente en el simulador, cambiarlas por lámparas halógenas de 500 W con una inclinación a 27°, con una separación de la matriz de puntos de 112 cm; combinada con un panel de cuatro lámparas fluorescentes de 27 W, temperatura de color de 6 500 K, a 90° o en disposición vertical respecto a la matriz de puntos con una separación de 30 cm y 20 cm del centro de la retícula

HOBO-U30	Unidades	Halógena + 4 fluorescentes en vertical
Radiación global	W/m ²	360
PAR	μE	606

Tabla 7 Prueba con lámpara halógena más combinación de 4 lámparas fluorescentes

Se tomaron como referencia datos medidos por Hortilux en cultivos en invernaderos con luz artificial en Holanda, para compararlos con los datos obtenidos después de nuestras mediciones (Tabla 6).

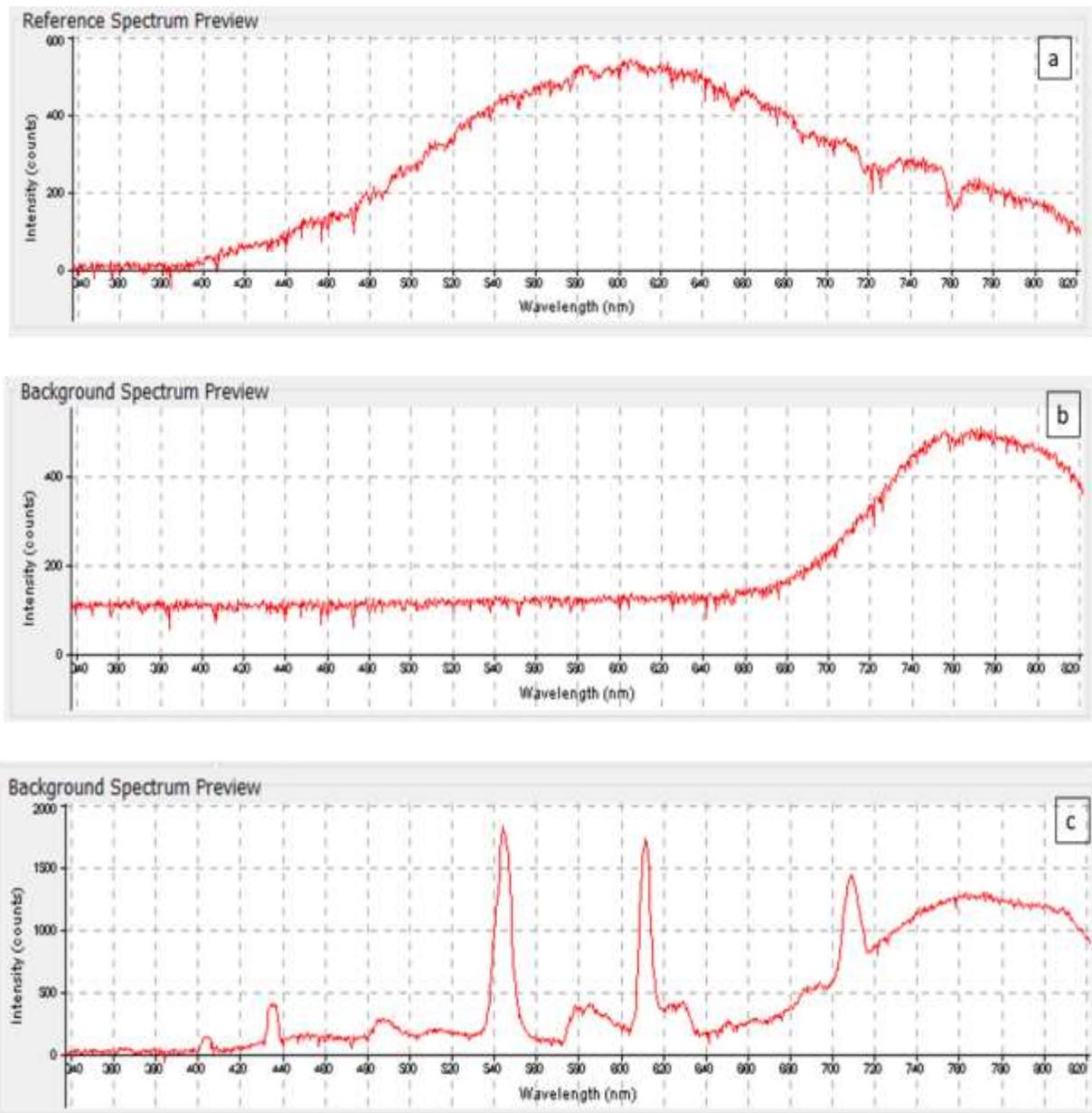
RADIACIÓN GLOBAL (W/m ²)	RFA (μmol m ² s ⁻¹)
10	21.5
50	108
100	215
150	323
200	430
250	538
300	645
400	860
500	1075
600	1290
700	1505
800	1720
900	1935
1000	2150

Tabla 8 Equivalencias de trabajo entre Radiación total, RFA y Lux (*Hortilux. , 2010*)

Realizando una comparación entre el balance obtenido por Hortilux y los datos obtenidos en el simulador de radiación solar de la UAM, se obtuvo una aproximación del 80% lo cual, dadas las condiciones del espacio, se consideró adecuado.

De igual modo se realizó la mediación de las frecuencias de onda con un espectrofotómetro STS, donde se muestra y explica como las lámparas fluorescentes aportan el complemento de frecuencia de onda, que

requieren las lámparas halógenas, para conseguir un balance entre radiación de onda larga y luz PAR semejante al que aportada por la radiación solar.



Gráfica 14 Graficas arrojadas por espectrofotómetro STS (a). Espectro de Radiación solar (b) Espectro de lámpara halógena de 500W (c) Espectro de lámparas fluorescentes

5.2.3 Equipo utilizado:

- Simulador de radiación solar
- Arreglo de luminarios adecuado a los arreglos con vegetación
- Bases de madera
- Placas de unicel de 5cm
- Estación meteorológica HOBO
- Sensor de radiación solar con HOBOWare
- Sensor de radiación PAR con HOBOWare
- Espectrofotómetro
- Anemómetro
- Termopares
- LiveView
- Cámara fotográfica
- Cámara de colores falsos
- Arreglos vegetales
 - Arreglo 1: “dedo de niño”
 - Arreglo 2: yerbabuena y manzanilla
 - Arreglo 3: acelga, lechuga y cebollín cambray
- Charolas con sustrato (en punto de marchitez)
- Espuma de poliuretano expandible
- Cúter
- Cinta aislante
- Papel aluminio
- Congelador eléctrico
- Bolsas de gel congelado

5.2.4 Procedimiento utilizado para realizar la experimentación

Previo a realizar Debido a que las pruebas se realizaron con sistemas con vegetación fue necesario modificar los luminarios originales del simulador no podían reproducir los niveles de radiación PAR. Por lo anterior fue necesario utilizar cuatro lámparas alógenas de 500w, mismas que se utilizaban anteriormente en el simulador.

Para que el espectro emitido por las lámparas alógenas fuera uniforme, fue necesario, en primera instancia elevar la altura del eje sobre el cual se encontraban las lámparas a 1.55m desde la base, posterior a esto se colocó una película de papel aluminio en el fondo del luminario para direccionar de manera más directa el espectro.

Se agregó al sistema de lámparas alógenas un corral adecuado con lámparas fluorescentes de 23w a una altura de 0.6m de la base al centro de la lámpara. Este corral cubría 3 de las 4 caras laterales del área de medición y en cada cara se colocaron 5 lámparas

Finalmente, para comprobar que los niveles de radiación eran uniformes en el área de medición se utilizaron dos métodos. El primero consistió en tomar medidas tanto de radiación total como de radiación PAR en distintos puntos de una retícula (misma que se utilizaría para la colocación de los termopares). El segundo método fue tomar una fotografía con colores falsos al área iluminada por el simulador.

Para poder realizar las mediciones correspondientes se armó un bastidor de madera sobre el cual se colocaron las charolas de cultivo, este bastidor funcionó como cama fría, ya que encima de esta base se colocaban las bolsas de gel congeladas, sobre las cuales descansaban los arreglos a medir.

Por la misma composición de los contenedores que se utilizan en los arreglos fue necesario colocar una placa metálica en la base de estos para que la distribución térmica fuera más uniforme, misma que se aisló utilizando espuma de poliuretano expandida.



Figura 23 Simulador de radiación solar ya adaptado para aporta los niveles de radiación PAR bajo los cuales funciona una muestra de techo verde.

Habiendo adecuado las charolas y la base de esta se cubrieron por un corral formado por 4 placas de unicel de 5cm de grosor para evitar que el calor al cual fueran sometidos los arreglos pudiera dispersarse en el ambiente.

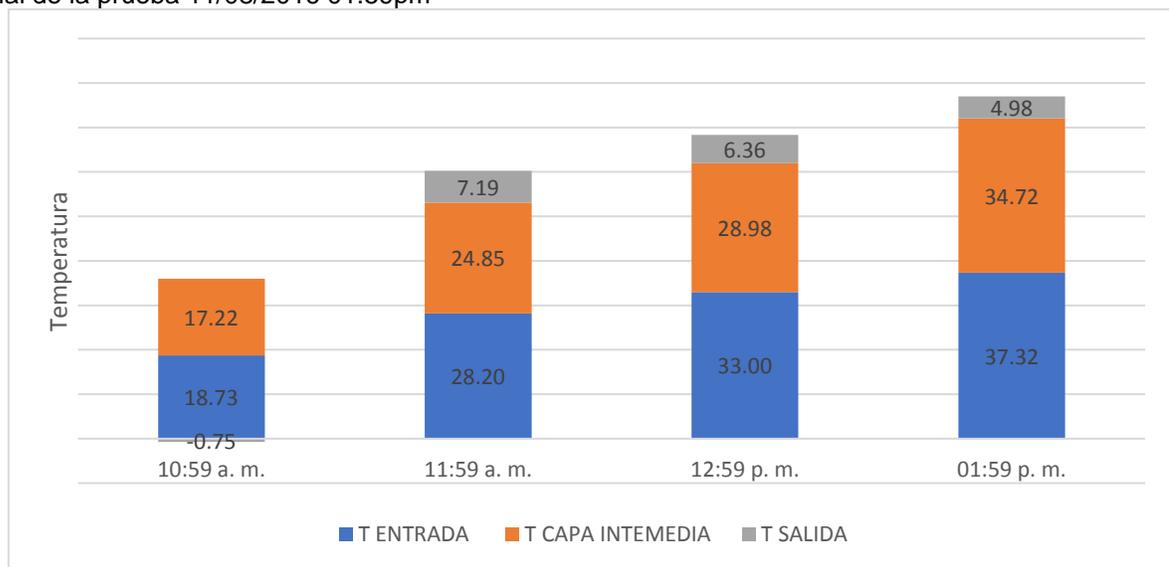
El equipo de medición utilizado durante la prueba fueron 15 termopares distribuidos en 5 puntos, uno por cada esquina y el restante al centro de la charola, a 3 distintas alturas, en la parte superior del arreglo, en la superficie del sustrato y en la placa metálica debajo de los contenedores plásticos. Lo anterior buscando conservar la verticalidad en la posición de cada uno de los sensores

Habiendo verificado que los niveles de radiación fueran los adecuados y que los arreglos vegetales se encontraban térmicamente aislados se procedió a correr la prueba, registrando las mediciones de los termopares en intervalos de 5 minutos, debido a que la vegetación se encontraba con un sustrato en punto de marchitez las pruebas se realizaron en periodos de entre 4 y 6 horas dependiendo de la condición en que la vegetación se encontrara.

Este procedimiento se siguió en los tres distintos arreglos vegetales y con una capa del sustrato sin vegetación

5.2.5 Resultados y análisis

Sustrato
 Inicio de la prueba 11/08/2016 10:59am
 Final de la prueba 11/08/2016 01:59pm

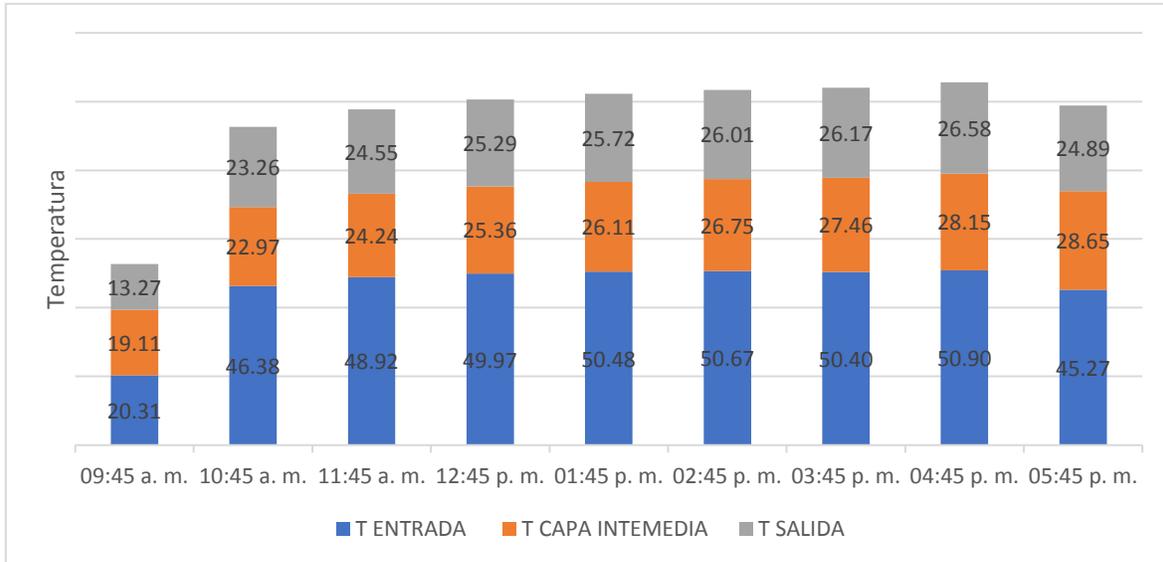


Gráfica 15 Comportamiento térmico del sustrato (TIERRA NEGRA) durante la prueba realizada en el simulador de radiación

Arreglo 1 “dedo de niño”

Inicio de la prueba 07/08/2016 09:45am

Final de la prueba 07/08/2016 05:45pm

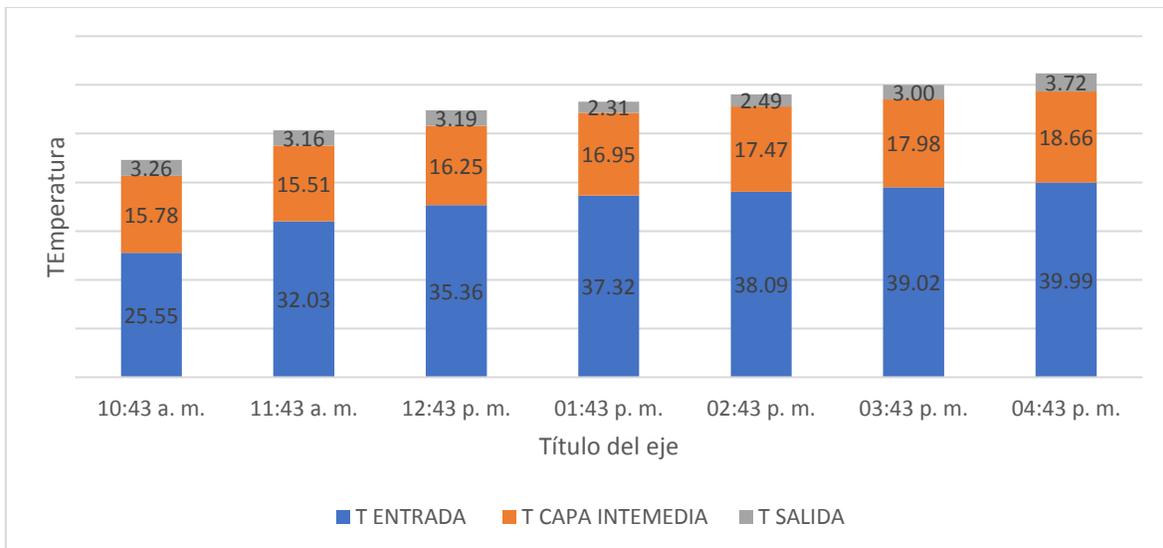


Gráfica 16 Comportamiento térmico del arreglo 1 (DEDO DE NIÑO) durante la prueba realizada en el simulador de radiación

Arreglo 2 “lechuga, acelga y cebollín”

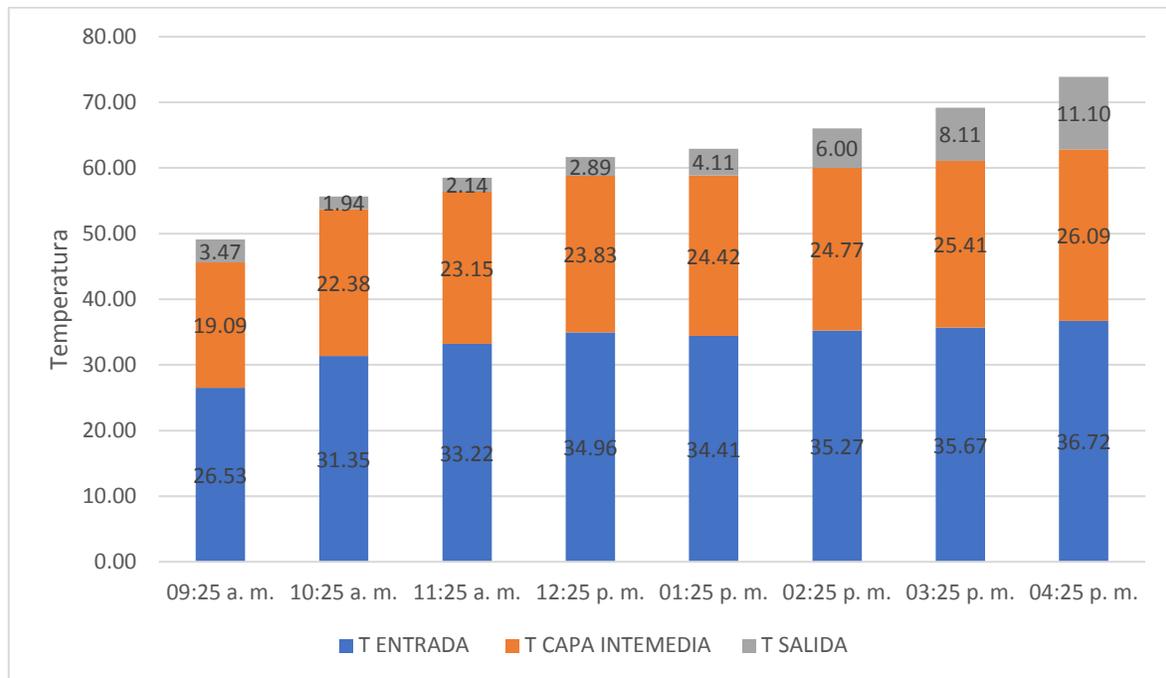
Inicio de la prueba 09/08/2016 10:43am

Final de la prueba 09/08/2016 04:43pm



Gráfica 17 Comportamiento térmico del arreglo 2 (HORTALIZAS) durante la prueba realizada en el simulador de radiación solar

Arreglo 3 “manzanilla y yerbabuena”
 Inicio de la prueba 05/08/2016 09:25am
 Final de la prueba 05/08/2016 04:25pm



Gráfica 18 Comportamiento térmico del arreglo 3 (HIERBAS) durante la prueba realizada en el simulador de radiación

Es importante mencionar que el arreglo formado por yerbabuena y manzanilla sufrió daños muy notorios debido al largo periodo a la radiación lo que ocasionó que para las siguientes pruebas fuera necesario sustituir completamente los sujetos que formaban los arreglos, este cambio alteró el cálculo de la conductividad dando resultados irreales pese a usar distintos métodos de cálculo, por lo que los resultados y procedimientos relacionados a este arreglo fueron desestimados en los procedimientos posteriores

Durante la prueba realizadas en el simulador de radiación solar se puede notar que al ser expuesto durante un periodo de tiempo menor la transferencia térmica es mucho más rápida cuando no se utilizó ningún arreglo vegetal, el sustrato registraba temperaturas de entrada, al inicio de la prueba de 18.73°C promedio

en la superficie y una temperatura en la parte baja del mismo la temperatura era de 17.22°C promedio, sin embargo, después de estar expuesto 3 horas se registraron temperaturas en la superficie de la capa de tierra de 37.32°C promedio mientras que en la base del mismo la temperatura ya era de 34.72°C.

Para el caso del arreglo conformado por hortalizas y rubrotintum se puede ver que pese a estar expuestas a la radiación durante un periodo de tiempo mayor, las temperaturas registradas en la parte baja del sustrato no habían sido tan bruscamente elevadas en el caso de las hortalizas, al inicio de la prueba, se registró una temperatura de entrada promedio de 25.55°C mientras que en la capa intermedia la temperatura promedio era de 15.78°C, al final de la prueba la temperatura de entrada era de 39.99°C en promedio mientras que en la capa intermedia se encontraba a 18.66°C.

Por su parte el arreglo conformado únicamente por dedo de niño registro una temperatura promedio de entrada de 20.31°C y una temperatura de 19.11°C promedio en la capa intermedia, esto al inicio de la prueba, después de 8 horas de prueba la temperatura en el intermedio era de 28.65°C promedio mientras que la temperatura en la capa superior del follaje era de 45.27°C

5.3 Cálculo de conductancia promedio

Para el cálculo de la conductividad se siguieron dos métodos teóricos ambos basados en los datos obtenidos en el simulador de radiación solar, y datos diversos correspondientes a los arreglos. Ambos métodos presentaron resultados muy similares, prácticamente idénticos, lo cual permitió la validación del método simplificado, a continuación, se presentan los resultados obtenidos en cada método, junto con los datos necesarios para llevar a cabo el cálculo

5.3.1 Método simplificado

Se le denominó método simplificado puesto que solo toma datos muy específicos para realizar el cálculo de conductividad. Los datos necesarios para este método son:

- Radiación
- Absortancia
- Área cubierta por la vegetación
- q la cual se obtiene del producto de los tres valores anteriores
- Espesor del sistema (vegetación más sustrato)
- Área

Δt el cual se obtiene de la diferencia de la temperatura de entrada (la que se encuentra en la parte superior del follaje de la planta menos la temperatura de salida, temperatura debajo del sustrato

La conductividad se obtiene de la siguiente formula

$$\Lambda = e \cdot q / A \cdot \Delta t \quad (1)$$

Los resultados obtenidos de acuerdo a la ecuación antes mencionada fueron en el caso del arreglo conformado únicamente por rubrotintum una k de 0.50 W/m^2 mientras que en el caso del arreglo conformado por hortalizas el resultado fue de 0.24 W/m^2

5.3.2 Método propuesto por Mária Machado, Celina Brito y Javier Neila

La siguiente metodología es la seguida en el artículo "LA CUBIERTA ECOLÓGICA COMO EQUIPO UTILIZADO DE CONSTRUCCIÓN" publicado por el Instituto de Investigaciones de la Facultad de Arquitectura de la Univ. del Zulia en Venezuela y el Dpto. de Construcción y Tecnología Arquitectónica E.T.S. de Arquitectura U.P.M España. (Mária Machado, 1999)

La cual sigue el modelo de Cálculo de Evolución de Temperaturas Interiores desarrollado por Neila (Mária Machado, 1999)

$$\Lambda = \frac{\{ \{ \{ \{ (I-R) \cdot I_o \} + R_L \} - 20\% E - 5\% F + \frac{[A \cdot h_c \cdot (T_e - T_{iv})]}{(T_{sv} - T_i)} \} \cdot e \} / \{ I - (R_{si} + R_m) \cdot \{ \{ \{ (I-R) \cdot I_o \} + R_L \} - 20\% E - 5\% F + \frac{[A \cdot h_c \cdot (T_e - T_{iv})]}{(T_{sv} - T_i)} \} \} \quad (2)$$

Donde:

- Q_v : Flujo de calor por convección dentro de la capa vegetal (W)
- A : Área (m²)
- h_c : Coeficiente convectivo para un flujo de aire en régimen turbulento
- $h_c = 1,52 \cdot (T_e - T_{iv})^{0.33}$
- T_{iv} : Temperatura del aire dentro de la capa vegetal (K)
- Q_c : Flujo de Calor por Conducción (W)
- A : Área (m²)
- R_{si} : Resistencia superficial interna de la cubierta, (m² K/W)
- R_m : Resistencia de los materiales de la cubierta del edificio que están debajo de la capa vegetal y el sustrato (m² K/W)
- e : Espesor de la capa vegetal más el sustrato (m)
- \square : Conductividad térmica de la capa vegetal más el sustrato (W /mK)
- T_e : Temperatura seca del aire exterior (K)
- T_i : Temperatura interior, medida en la capa más interna de la cubierta del edificio (K)

Los valores ya mencionados se integraron en una tabla Excel siguiendo la ecuación propuesta por Neila con datos obtenidos directamente en el modelo (1), por estimaciones (2) y bibliográficos. (3)

	Parámetro	Sedum Rubrotintum	Hortaliza
1	Absortancia	0.926	0.850
1	Radiación total	89.280	44.640
1	Radiación onda larga	0.500	0.500
3	AREA de planta	0.095	0.104
2	HC	2.730	3.165
3	Delta t	5.900	9.230
1	T superficie	293.450	288.922
1	T placa	279.078	276.167
2	Espesor planta	0.400	0.400
3	RSI	0.667	0.667
3	RM	0.135	0.135
1	TE	298.150	298.150
1	TIV	292.250	288.920
2	Λ	0.467	0.257

Tabla 9 Datos para resolver ecuación “ Λ ” basada en el modelo de Cálculo de Evolución de Temperaturas Interiores desarrollado por Neila (Mária Machado, 1999)

Se debe destacar que no solamente contempla los aspectos térmicos que afectan el sistema vegetal, sino que también está considerando una pérdida por evaporación y la temperatura existente al interior del follaje, así como la temperatura ambiente.

Los resultados arrojados siguiendo la ecuación presentada por Machadoo fueron una k de .467 W/m°C para el arreglo del dedo de niño y una de k de 0.257 W/m°C en el caso de las hortalizas siendo la diferencia .033 menor en el caso del arreglo 1 y .017 mayor en el caso del arreglo 2 esto en comparación al método simplificado

6 Datos para simulación en modelo numérico

Los siguientes son datos necesarios para poder realizar la simulación en el modelo numérico de Energy Plus en su plataforma Design Builder.

Estas pruebas se realizaron con muestras representativas de los dos arreglos vegetales con los que se realizara la simulación, estas muestras tienen dimensiones controladas para facilitar el manejo de las mismas, y así evitar disminuir la probabilidad que exista alguna alteración por elementos externos a la prueba

6.1 Pesos y volumen

6.1.1 Equipo utilizado

- Arreglos vegetales
 - Arreglo 1: “dedo de niño”
 - Arreglo 2: yerbabuena y manzanilla
 - Arreglo 3: acelga, lechuga y cebollín cambray
- Sustrato
- Charolas de estireno
- Malla de gallinero
- Vaso de precipitados capacidad 1l
- Balanza Brauker modelo YP200

6.1.2 Procedimiento utilizado para realizar la experimentación:

La prueba consiste en dos etapas, la primera consiste en determinar cuál es el peso de la charola promedio de cada arreglo, mientras la segunda parte consiste en determinar el volumen que abarcan cada una de las especies utilizadas. Estos dos parámetros son los necesarios para determinar la densidad de cada uno de los arreglos.

Para determinar el peso se utilizaron los contenedores de estireno que se utilizaron en las demás pruebas relacionadas con la obtención de datos para el modelo numérico. El procedimiento consistió en colocar sobre la báscula cada charola correspondiente a cada uno de los arreglos vegetales.

El segundo experimento está basado en la prueba realizada por Arquímedes para determinar la densidad de un objeto, para esto se utilizó un vaso de precipitados con capacidad de un litro dentro del cual se sumergieron los componentes superficiales de la planta, es decir todos aquellos elementos de la planta que no se encontraran dentro del sustrato.

Para realizar la prueba primero se revisó el volumen desplazado por la rejilla hecha de malla de gallinero, cuyo valor fue posteriormente restado al volumen total desplazado. Una vez conocido el volumen desplazado por la rejilla se sumergió dentro del vaso de precipitados todos los elementos podados correspondientes a cada uno de los arreglos, presionando estos hacia el fondo del vaso con ayuda de la rejilla, registrando cual era el volumen desplazado.

Finalizada la prueba se volvió a pesar las charolas ya sin los elementos sumergidos para determinar la diferencia en el peso

6.1.3 Resultados

Pesos antes de poda

- Arreglo 1: 2.460 kg
- Arreglo 2: 2.855 kg
- Arreglo 3: 2.010 kg

Volumen

- Volumen base 500ml
- Volumen con rejilla 520ml
 - Volumen desplazado por la rejilla 20ml
- Volumen arreglo 1 610ml
 - Volumen desplazado 110ml
- Volumen arreglo 2 525ml
 - Volumen desplazado 25ml
- Volumen arreglo 3 575ml
 - Volumen desplazado 75ml

Peso después de poda

- Arreglo 1: 1.15 kg (1.31)
- Arreglo 2: 1.205 kg (1.65)
- Arreglo 3: 0.97 kg (1.04)

6.2 Factor de cobertura

El procedimiento consiste en realizar una fotografía plana a los arreglos vegetales contenidos en una charola cuya área sea conocida. Esta fotografía permite contrastar entre las áreas cubiertas por la vegetación y las que quedan expuestas a radiación directa.

6.2.1 Equipo utilizado

- Charolas de cultivo
- Arreglos vegetales
 - Arreglo 1: “dedo de niño”
 - Arreglo 2: yerbabuena y manzanilla
 - Arreglo 3: acelga, lechuga y cebollín cambray
- Cámara fotográfica (Nikon d3100)
- Objetivo Nikon 50mm
- Tripie para cámara fotográfica
- Difusor para flash

6.2.2 Procedimiento utilizado para realizar la experimentación:

El contenedor que se utilizó para tomar las fotografías fue una charola plástica con un área de 0.1488m^2 , mismas que se utilizaron para modular el sistema.

Se formaron arreglos vegetales mixtos, con individuos cuya talla representara el tamaño estándar de cada especie, así como se replicó el acomodo que cada especie sigue respectivamente en las charolas de cultivo.

Una vez realizada la fotografía se realizó un trazo en AutoCAD sobre el área cubierta por vegetación, este resultado fue posteriormente restado a la superficie total de la charola y multiplicado por el número de charolas que conforman un metro cuadrado.

6.2.3 Resultados y análisis

Dedo de niño

- Área del contenedor 0.1488m²
- Área cubierta por la planta 0.095m²
- Área cubierta por la planta en un metro cuadrado promedio 0.641 m²



Figura 24 Arreglo dedo de niño

Arreglo de yerbabuena y manzanilla

- Área del contenedor 0.1488m²
- Área cubierta por la planta 0.109m²
- Área cubierta por la planta en un metro cuadrado promedio 0.732 m²



Figura 25 Arreglo de yerbabuena y manzanilla

Arreglo de lechuga, acelga y cebollín

- Área del contenedor 0.1488m²
- Área cubierta por la planta 0.104m²
- Área cubierta por la planta en un metro cuadrado promedio 0.698 m²



Figura 26 Arreglo de lechuga, acelga y cebolla cambray

6.3 Tasa de evaporación

6.3.1 Equipo utilizado

- Arreglos vegetales
 - Arreglo 1: "dedo de niño"
 - Arreglo 2: yerbabuena y manzanilla
 - Arreglo 3: acelga, lechuga y cebollín cambray
- Sustrato
- Cubierta de pet y madera
- Malla sombra 50%
- Charolas de estireno
- Cinta adhesiva
- Filtro color café
- Silicón (utilizado para trabajos de cancelería o plomería)
- Vaselina blanca
- Taladro con broca
- Basculas
 - Modelo 1: Braunker modelo YP200
 - Modelo 2: Justa modelo XK3101-PJ
- Equipo de medición especializados
- Estación meteorológica HOBO
- Sensores especializados para estación meteorológica

- Viento
- Radiación total
- Radiación PAR
- Humedad
- Precipitación
- Software especializado HOBO Ware
- Cámara fotográfica (GoPro Hero 4)

6.3.2 Procedimiento utilizado para realizar la experimentación:

Determinar la tasa de evaporación de cada arreglo, mediante la relación existente con las condiciones climatológicas y la tasa de transpiración de la vegetación, en condiciones de humedad distintas, durante un periodo de tiempo establecido.

Buscando que la relación de los datos obtenidos por las basculas tuvieran una relación real con las condiciones climatológicas existentes al momento de realizar las mediciones, se colocó la estación climatológica, del laboratorio de arquitectura bioclimática, a un costado de donde se realizaron las mediciones esto con el fin de que las condiciones a las que las muestras fueran expuestas, fueran las mismas que registrarán los sensores de la estación.

Con el fin de evitar que hubiera alteraciones durante las mediciones, fue necesario construir una cubierta de PET, la cual permitiera el paso de radiación a las charolas, sin el riesgo que algún elemento ajeno, como lluvia o algún objeto alterara las mediciones o dañara las básculas. La base de la cubierta consistió en una estructura cúbica formada por listones de madera, donde la única cara cubierta fue la superior, sobre la cual se apoyó la placa de PET, permitiendo que el manejo de las muestras se realizara por alguna de las otras caras descubiertas.

Para poder realizar las mediciones se elaboraron dos contenedores de estireno blanco de 23cm x15cm x 15cm, cuyas uniones fueron selladas con silicón para evitar cualquier posible filtración. El tamaño de cada contenedor equivale a la cuarta parte de las charolas que se utilizaron para los cultivos.

Es importante señalar que la base de uno de los contenedores fue perforada con taladro para permitir el libre dren de agua, este contenedor se utilizó para el arreglo cuyo sustrato se encontraba a capacidad de campo.

*Estos contenedores se utilizaron durante todo el proceso de pruebas relacionados a la obtención de datos para el modelo numérico.

Como ya se mencionó en el punto anterior, fue necesario que uno de los arreglos a medir se encontrara a capacidad de campo, mientras que el sustrato del otro contenedor se debía de encontrar en su punto de

marchitez, esto para que la prueba se desarrollara en dos condiciones diferentes y observar el comportamiento de la vegetación ante la falta de riego en estos dos escenarios, y si esto modificaba su metabolismo.

Una vez alcanzada la capacidad de campo y el punto de marchitez en su respectivo contenedor es necesario bloquear el sustrato, esto con el objetivo que las mediciones que se obtengan sean únicamente las generadas por la vegetación. Para esto se recortaron pequeñas tiras fieltro color café, las cuales se cubrieron con una capa espesa de vaselina blanca, lo anterior permitió bloquear la transpiración por parte del sustrato sin alterar la cobertura de las plantas

Otra medida para evitar que el sustrato pudiera seguir filtrando agua en el caso del arreglo a capacidad de campo se colocó un plástico en la base del contenedor y se selló con cinta adhesiva.

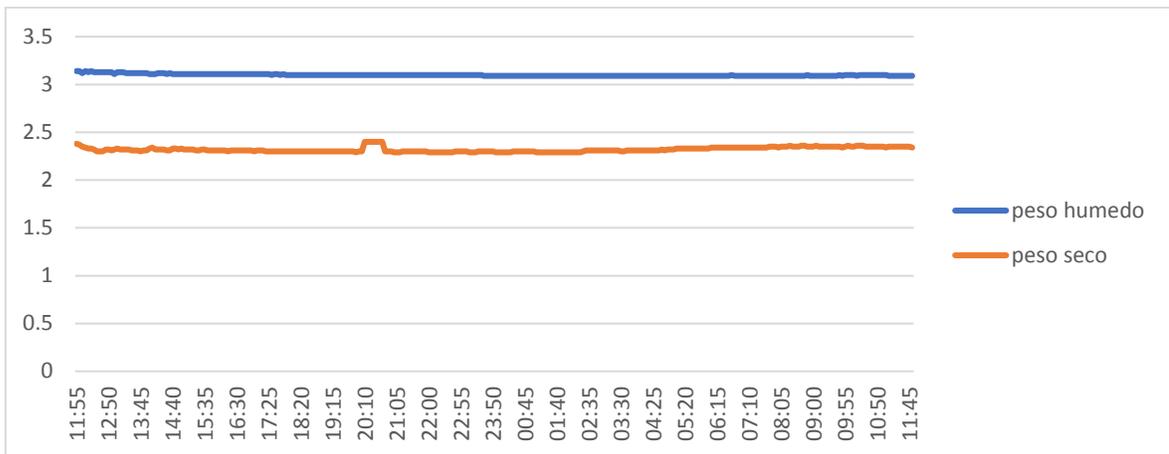
Habiendo verificado que no existía ninguna filtración en los arreglos se colocaron sobre las basculas los arreglos y se programó la cámara fotográfica a tomar una foto de los displays de las basculas cada minuto, esto con el fin de sincronizar posteriormente las imágenes con los datos arrojados por la estación meteorológica.

6.3.3 Resultados

Arreglo dedo de niño

- Inicio de la medición 28/10/2016 11:55 am
 - Peso arreglo capacidad de campo 3.14kg
 - Peso arreglo punto de marchitez 2.38kg
- Final de la medición 29/10/2016 11:50 am
 - Peso arreglo capacidad de campo 3.09kg
 - Peso arreglo punto de marchitez 2.34kg

En el caso del arreglo de dedo de niño después de un periodo de 24 horas existió una diferencia de pesos de 0.05kg en el caso del arreglo de capacidad de campo mientras que en el que se encontraba a punto de marchitez la diferencia fue de 0.04kg lo que equivale a una pérdida del 1.6% y del 1.7% respectivamente

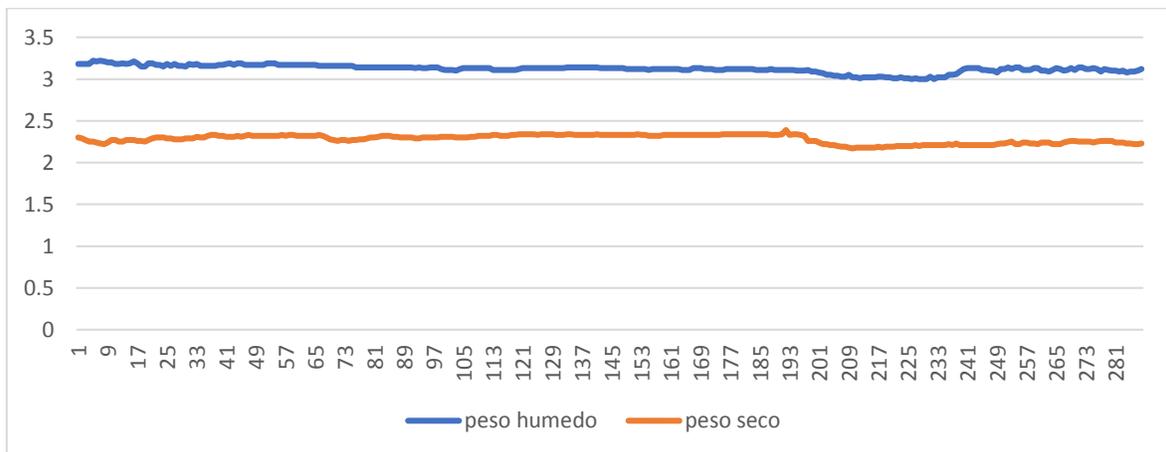


Gráfica 19 Prueba dedo de niño pesos registrados durante un periodo de 24 horas exponiendo las muestras únicamente a radiación solar y bloqueando el sustrato para que no existieran ganancias o pérdidas a través del mismo

Arreglo yerbabuena y manzanilla

- Inicio de la medición 07/12/2016 14:56 pm
 - Peso arreglo capacidad de campo 3.18kg
 - Peso arreglo punto de marchitez 2.30kg
- Final de la medición 07/12/2016 14:55 pm
 - Peso arreglo capacidad de campo 3.12kg
 - Peso arreglo punto de marchitez 2.23kg

Para el arreglo de manzanilla y yerbabuena la diferencia en el peso fue de 0.04kg y 0.07kg respectivamente, esto equivale a una pérdida del 1.9% y 3.05%

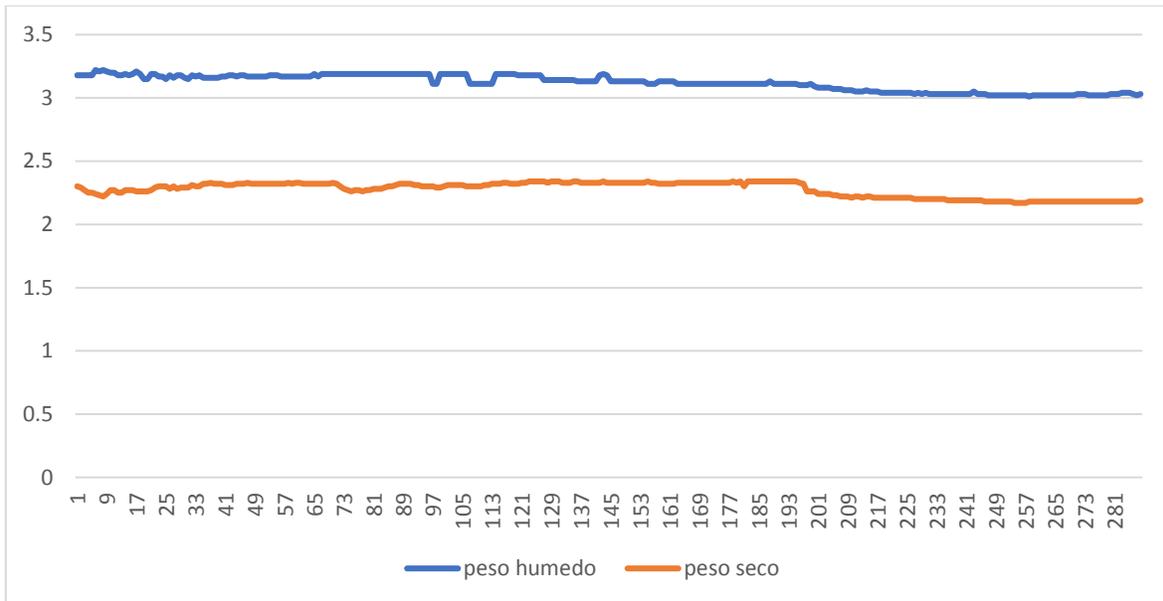


Gráfica 20 Prueba yerbabuena y manzanilla pesos registrados durante un periodo de 24 horas exponiendo las muestras únicamente a radiación solar y bloqueando el sustrato para que no existieran ganancias o pérdidas a través del mismo

Arreglo lechuga, acelga y cebollín

- Inicio de la medición 30/11/2016 14:36 pm
 - Peso arreglo capacidad de campo 3.18kg
 - Peso arreglo punto de marchitez 2.30kg
- Final de la medición 07/12/2016 14:31 pm
 - Peso arreglo capacidad de campo 3.03kg
 - Peso arreglo punto de marchitez 2.19kg

En el caso del arreglo de hortalizas la diferencia después de 24 horas de registro fue de 0.15kg y 0.11kg respectivamente, equivalentes a una diferencia del 4.8% para el arreglo de capacidad de campo y 4.79% para el contenedor en punto de marchitez



Gráfica 21 Prueba lechuga, acelga y cebolla cambray pesos registrados durante un periodo de 24 horas exponiendo las muestras únicamente a radiación solar y bloqueando el sustrato para que no existieran ganancias o pérdidas a través del mismo

6.4 Índice de área foliar, LAI

6.4.1 Equipo utilizado

- Charolas de estireno
- Arreglos vegetales
 - Arreglo 1: “dedo de niño”
 - Arreglo 2: yerbabuena y manzanilla
 - Arreglo 3: acelga, lechuga y cebollín cambray
- Scanner (Epson tx240)
- Tijeras
- AutoCAD

6.4.2 Procedimiento utilizado para realizar la experimentación:

El índice de área foliar se determina mediante el Método de Conteo de Intersecciones, al igual que en el procedimiento seguido para obtener la tasa de transpiración, se tomó una sección, cuya área es conocida, en la cual se pudiera representar el estado típico de las charolas correspondientes a cada arreglo vegetal.

Habiendo realizado la selección de vegetación el siguiente paso fue, podar de manera cuidadosa cada uno de los sujetos, separando únicamente las hojas para así poder realizar el escaneo y el trazo correspondiente de cada especie.

Con las hojas clasificadas y cuidando que estas se encontraran bien extendidas se colocaron sobre la charola del scanner para posteriormente digitalizarlas. Es importante que el procedimiento se haga de manera inmediata después de realizar la poda para que la alteración de las hojas sea mínima. (J, 1976)

Posterior a ~~este~~ se deben de sustituir los valores en la siguiente ecuación

$$A=n \times (s/N)$$

Ecuación 1 Ecuación índice de área foliar

- A siendo el área de las hojas
- n número de intersecciones que tocan las láminas de las hojas
- S superficie de la placa
- N número total de intersecciones



Figura 27 Escaneo de hojas yerbabuena



Figura 28 Escaneo de hojas de lechuga

Habiendo escaneado todas las muestras con ayuda de AutoCAD se escaló la imagen a tamaño real y se realizó un trazo en el perímetro de las hojas con poli línea, lo anterior permite que el programa calcule y sume las áreas correspondientes a cada hoja lo que dio como resultado el LAI promedio por planta



Figura 29 Detalle de trazo de hojas de yerbabuena

6.4.3 Resultados

Especie	Área	Unidad	LAI
Dedo de niño	735.32	cm ²	0.493
Manzanilla	54	cm ²	0.049
Yerbabuena	389	cm ²	0.356
Lechuga	1115.76	cm ²	10.721
Acelga	917.97	cm ²	0.881
Cebollín	377.78	cm ²	0.362

Tabla 10 Área total por arreglo de cada especie y LAI correspondiente

La tabla anterior muestra el área total, por arreglo, de cada especie y su índice de área foliar lo anterior se obtiene de la división del área obtenida de las hojas correspondientes de cada arreglo entre el área del contenedor que es de .1488m²

6.5 Absortancia

6.5.1 Equipo utilizado

- Muestra de cada especie perteneciente a cada arreglo
- Muestra de sustrato
- Muestra de fieltro
- Estación meteorológica HOBO
- Sensor especializado para estación meteorológica
- Espectrofotómetro
- HOBO WARE

6.5.2 Procedimiento utilizado para realizar la experimentación:

Se tomó una muestra de cada una de las especies pertenecientes a cada uno de los arreglos, así como una muestra de sustrato, en condiciones de punto de marchitez y capacidad de campo.

Para poder calibrar el espectrofotómetro, es necesario realizar una medición al aire libre en condición de cielo despejado, misma medición que se realizó en la azotea del laboratorio de radiación solar



Figura 30 Calibración espectrofotómetro

Teniendo la muestra en condiciones de cielo despejado se realizaron las mediciones en cada una de las muestras dentro de las instalaciones del heliodom, lo anterior para que no existieran filtraciones de luz ajenas a la emitida por la lámpara del espectrofotómetro



Figura 31 Prueba realizada dentro del heliodom

6.5.3 Resultados

Especie	Longitud de onda nm	Reflectancia	Absortancia
Acelga	575.8901	20.5389	.7946
Lechuga	575.8901	15.7938	.8420
Cebollín	575.8901	8.7435	.9125
Yerbabuena	575.8901	18.8005	.8119
Manzanilla	575.8901	15.0922	.8490
Dedo de niño (condición 1, aplastada)	575.8901	7.4283	.9257
Dedo de niño (condición 2, natural)	575.8901	8.8812	.9111
Sustrato (condición 1, punto de marchitez)	575.8901	1.2453	.9875
Sustrato (condición 2, capacidad de campo)	575.8901	3.2253	.9677
Filtro café	575.8901	8.7435	.9721

Tabla 11 Reflectancia y absortancia de acuerdo a cada especie

7 Análisis de transferencia térmica

7.1 Introducción a la simulación de modelo numérico

La siguiente es la metodología mediante la cual se realizaron las simulaciones en modelos numéricos. Esto mediante el uso del software especializado Design Builder, cuya plataforma de cálculo es Energy Plus TM.

EnergyPlus TM es un programa de simulación de energía de edificios que los ingenieros, arquitectos e investigadores utilizan para modelar tanto el consumo de energía (para calefacción, refrigeración, ventilación, iluminación y cargas de tapones y procesos) como el uso del agua en los edificios. El software fue desarrollado por el departamento de energía de los Estados Unidos y la oficina de tecnologías de la construcción (U.S. Department of Energy's (DOE) Building Technologies Office (BTO), and managed by the National Renewable Energy Laboratory (NREL).)

Por su parte Design Builder es un software especializado en la simulación ambiental y energética de edificios. Sus herramientas permiten evaluar aspectos como los niveles de confort, los consumos de energía y las emisiones de carbono. Tomando como motor de cálculo EnergyPlus TM (DesignBuilder Software Ltd)

7.2 Procedimiento

Como primer paso se modelo directamente en Design Builder un bloque con orientación norte sur, sin ventilaciones ni puertas, que representara una construcción con base 14.138m² con una cubierta de concreto armado de 0.1m de espesor y un sistema de muros conformado de tres capas: mortero premezclado, 0.01m, bloc concreto, 0.1m, empastado de yeso, 0.01m. Las propiedades higrótérmicas de acuerdo los equipo utilizados ya mencionados van de acuerdo a lo establecido en la norma ISO10456 (ISO 10456:, 2012)

Este módulo funciona como elemento de control para realizar las pruebas siguientes, donde la única modificación que se realizó a este, fue la adición del sistema de azoteas verdes, de acuerdo a las especificaciones solicitadas por el mismo programa y adecuadas a cada uno de los casos de estudio. Esto con el fin de que la única alteración en los resultados proviniera de las modificaciones realizadas a la cubierta.

A lo anterior hay que añadir que se estableció que no existiera ningún elemento que pudiera generar ganancias térmicas al interior del espacio del módulo, por lo que la actividad al interior del espacio fue marcada como nula y que el uso de electrodomésticos u otros aparatos dentro de la programación diaria del espacio no se aplicaría.

Las modificaciones que se realizaron al sistema de constructivo de la cubierta fueron; agregar una capa de sustrato (SC2), representando el periodo de en el que no se tiene vegetación o que la cubierta de la misma no es lo suficientemente densa, arreglo basado en hortalizas (SC3), arreglo utilizando únicamente rubrotintum o dedo de niño (SC4). Para que al momento de realizar la simulación no existiera alguna alteración por la sombra proyectada por alguno de los otros cubos, se optó por realizar la simulación de manera individual.

La locación que se eligió para realizar la simulación fue la CDMX, específicamente el aeropuerto internacional Benito Juárez de la CDMX, utilizando un archivo con extensión epw obtenido de Meteonorm V7 correspondiente a las coordenadas establecidas en el capítulo de climatología.

La simulación se realizó en tres diferentes periodos; una simulación correspondiente al día típico tanto del periodo frío (9 de noviembre) como al del periodo cálido (20 de mayo) y finalmente se realizó una simulación anual integrando a la misma un equipo de refrigeración y calefacción adecuados a la zona de confort, obtenida de acuerdo a la fórmula de Auliciems.

7.2.1 Cubierta vegetal en Design Builder

Para habilitar la opción de cubierta vegetal en Design Builder es necesario ingresar a la ventana de edición de equipo utilizados desde la opción de cerramientos. En esta ventana se puede modificar el sistema constructivo de la cubierta del módulo que se está analizando, se debe de seleccionar la capa exterior y una vez dentro de la ventana de edición de equipo utilizados aparecen 5 pestañas, la tercera es la correspondiente a cubierta vegetal, los usuarios deben de completar los campos que solicita el software de acuerdo a lo obtenido en el capítulo 5, datos para simulación de modelo numérico.

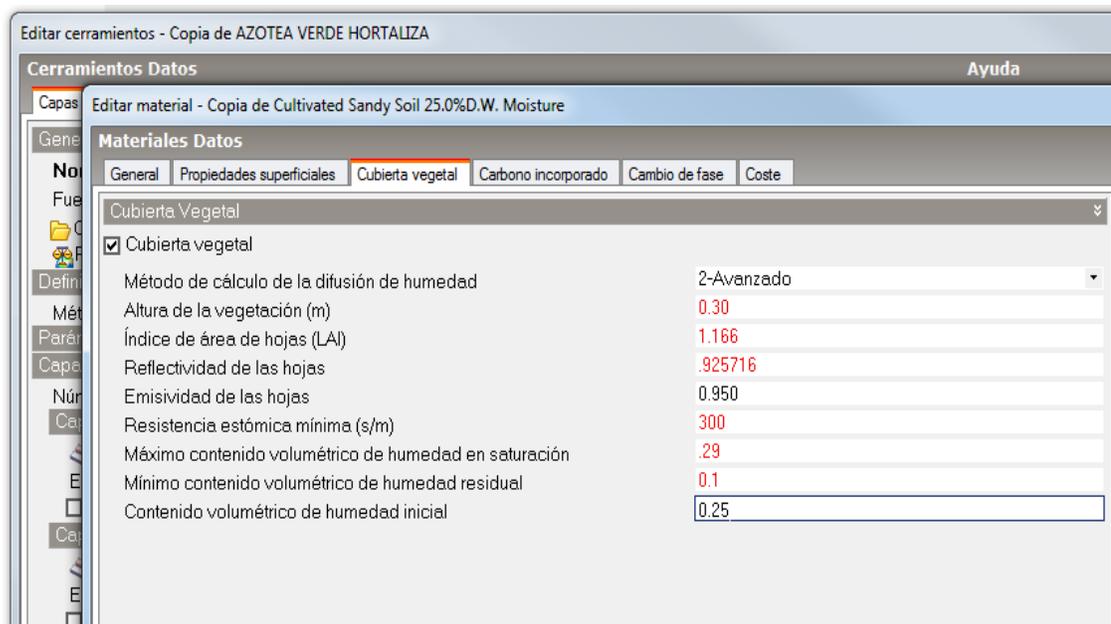


Figura 32 Pestaña de edición de cubierta vegetal en Design Builder

Una vez realizada la modificación al sistema constructivo se puede realizar la simulación en el periodo deseado, importante mencionar que esta modificación debe de adecuarse a cada uno de los sistemas de vegetación que se requiera analizar.

7.3 Resultados

7.3.1 Caso 1 comparación entre la temperatura superficial del interior y exterior de la cubierta en el día típico periodo cálido, 20 de mayo.

El periodo de la simulación abarca 24 horas, desde la 1:00am del día 20 de mayo hasta las 0:00am del día 21 de mayo. La temperatura de bulbo seco oscila entre los 12.25 °C, a las 4:00am, y los 25.5°C, a las 3:00pm, oscilación de 13.25°C.

Para el caso de la cubierta de concreto, SC1, la temperatura media al exterior fue de 21.16°C mientras que al interior fue de 21.33°C, donde la temperatura más alta al exterior se presenta a las 5:00pm, 30.87°C, mientras que al interior se presenta dos horas antes, a las 3:00pm, 36.44°C, con una oscilación de 5.57°C.

La cubierta con la adición de la capa de sustrato sobre la superficie, SC2, presento temperaturas promedio de 22.27°C en la superficie exterior de la cubierta mientras que al interior se registró un promedio de

21.58°C, en este sistema, la temperatura exterior más alta fue de 38.66°C a las 2:00pm mientras que al interior el registro más elevado fue de 28.11°C a las 6:00pm con una oscilación de 10.55°C.

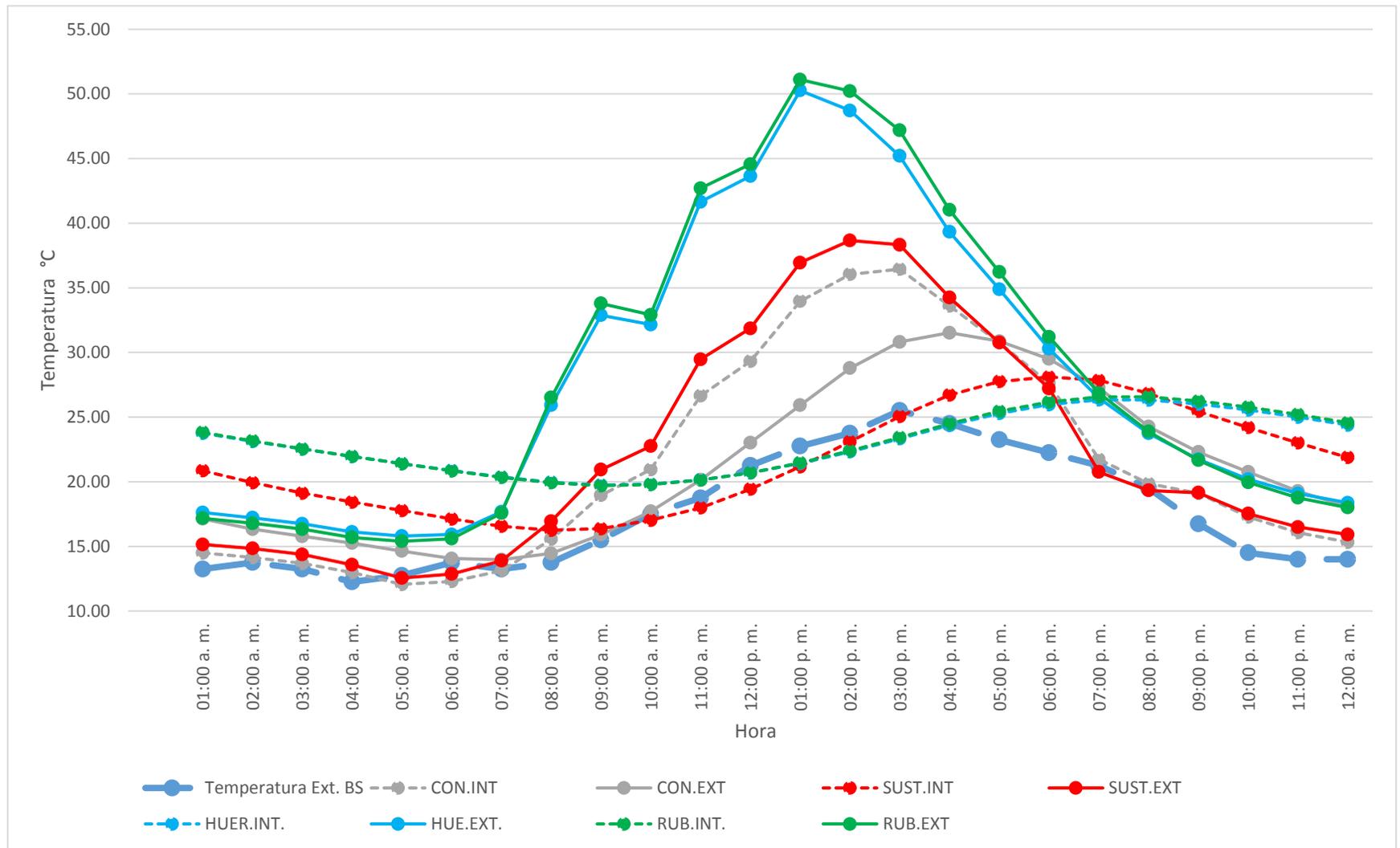
La azotea con la cubierta con el arreglo basado en hortalizas, SC3, registró una temperatura promedio de 27.98°C al exterior y 22.94°C al interior, la temperatura máxima registrada al exterior de la cubierta fue de 50.26°C a las 1:00pm mientras que al interior la temperatura máxima registrada fue de 26.34°C a las 7:00pm con una oscilación entre estas de 23.92°C.

Por último, la cubierta con un arreglo únicamente de Rubrotintum, SC4, registro una temperatura promedio al exterior de 28.38°C mientras que al interior el promedio fue de 23.03°C, en este caso la temperatura superficial exterior más elevada fue de 51.10°C registrada a las 1:00pm, por su parte al interior se registró una temperatura de 26.57°C a las 8:00pm con una oscilación de 24.53°C de diferencia.

Se puede notar que la temperatura al interior del módulo con cubierta SC1 alcanza una temperatura mayor al interior del espacio que la que se registra afuera de la superficie con una diferencia de casi 6°C, este fue el único caso en que la temperatura exterior fue menor a la registrada al interior. En este mismo caso se puede observar que la temperatura exterior más alta se da a las 5:00pm a diferencia de los otros dos casos en donde las temperaturas máximas se registran entre la 1:00pm y las 2:00pm

Al comparar las temperaturas superficiales exteriores con registradas al interior de las superficies es evidente que los sistemas con vegetación presentan una mayor diferencia, en ambos casos, mientras que al interior la temperatura oscila en los 21.4°C la temperatura superficial exterior rebasa los 50°C y tarda 6 (en el caso del SC3) y 7 horas (SC4) en alcanzar las temperaturas más altas registradas al interior. Por su parte en el SC2 no se presenta una diferencia tan amplia entre la temperatura exterior e interior y el tiempo entre ambos picos es de solamente 4 horas.

A continuación, se presenta la tabla de resultados de las temperatura superficial interior y exterior obtenida en la simulación en los distintos sistemas al igual que la gráfica correspondiente:



Gráfica 22 Caso 1 comparación entre la temperatura superficial del interior y exterior de la cubierta en el día típico periodo cálido, 20 de mayo.

Hora	SC1			SC2			SC3			SC4		
	TSI	TSE	OSC									
01:00	14.50	17.13	2.64	20.85	15.15	-5.70	23.75	17.62	-6.13	23.82	17.17	-6.65
02:00	14.13	16.33	2.20	19.93	14.84	-5.09	23.12	17.21	-5.91	23.17	16.79	-6.38
03:00	13.69	15.78	2.10	19.13	14.38	-4.75	22.52	16.75	-5.77	22.55	16.33	-6.22
04:00	12.97	15.25	2.28	18.43	13.57	-4.86	21.95	16.12	-5.84	21.96	15.69	-6.28
05:00	12.06	14.64	2.57	17.78	12.55	-5.22	21.40	15.80	-5.61	21.40	15.39	-6.00
06:00	12.29	14.06	1.77	17.12	12.86	-4.26	20.87	15.92	-4.95	20.85	15.59	-5.25
07:00	13.12	13.97	0.85	16.56	13.89	-2.67	20.37	17.68	-2.69	20.34	17.57	-2.77
08:00	15.55	14.45	-1.10	16.25	16.95	0.69	19.96	25.92	5.96	19.92	26.51	6.59
09:00	18.96	15.91	-3.05	16.38	20.93	4.55	19.74	32.88	13.13	19.70	33.79	14.09
10:00	20.94	17.71	-3.23	17.02	22.75	5.73	19.82	32.16	12.34	19.79	32.91	13.12
11:00	26.65	20.14	-6.51	17.99	29.47	11.48	20.15	41.65	21.50	20.14	42.70	22.56
12:00	29.32	23.02	-6.30	19.43	31.86	12.42	20.68	43.64	22.96	20.70	44.56	23.86
13:00	33.97	25.92	-8.05	21.16	36.94	15.79	21.42	50.26	28.84	21.46	51.10	29.64
14:00	36.05	28.79	-7.26	23.10	38.66	15.56	22.32	48.72	26.40	22.39	50.21	27.83
15:00	36.44	30.81	-5.63	25.05	38.33	13.29	23.33	45.20	21.87	23.42	47.18	23.76
16:00	33.60	31.53	-2.07	26.71	34.25	7.54	24.36	39.33	14.96	24.49	41.02	16.54
17:00	30.75	30.87	0.12	27.76	30.76	3.01	25.29	34.88	9.60	25.45	36.22	10.77
18:00	27.62	29.50	1.88	28.11	27.21	-0.90	25.96	30.29	4.32	26.16	31.21	5.05
19:00	21.73	27.26	5.53	27.85	20.76	-7.09	26.34	26.48	0.14	26.57	26.85	0.29
20:00	19.86	24.26	4.41	26.83	19.33	-7.50	26.32	23.74	-2.58	26.57	23.88	-2.69
21:00	19.11	22.30	3.20	25.45	19.15	-6.30	26.00	21.74	-4.27	26.25	21.66	-4.58
22:00	17.28	20.75	3.47	24.20	17.53	-6.67	25.55	20.19	-5.36	25.78	19.95	-5.83
23:00	16.06	19.27	3.21	23.01	16.49	-6.52	25.00	19.08	-5.91	25.21	18.76	-6.45
00:00	15.32	18.07	2.75	21.88	15.92	-5.96	24.38	18.37	-6.02	24.56	18.01	-6.56
TM	21.33	21.16		21.58	22.27		22.94	27.98		23.03	28.38	
AMRT	0.917			1.178			1.236			1.251		

Tabla 12 Comparación entre la temperatura superficial interior y exterior del día típico del periodo cálido

SC1: Sistema de losa de concreto armado, módulo de control

SC2: Sistema de losa de concreto armado con capa de sustrato sin vegetación

SC3: Sistema de losa de concreto armado y sistema de cubierta vegetal con arreglo de hortalizas

SC4: Sistema de losa de concreto armado y sistema de cubierta vegetal con arreglo de rubrotintum

T.S.I.: Temperatura superficial al interior de la losa °C

T.S.E.: Temperatura superficial al exterior de la losa C

OSC: Oscilación en °C

T. PROM: Temperatura promedio

AMRT: Amortiguamiento en °C del periodo más crítico y es resultado de la división de la temperatura máxima interior entre la temperatura máxima exterior

7.3.2 Caso 2 comparación entre la temperatura superficial del interior y exterior de la cubierta en el día típico periodo frío, 9 de noviembre.

El periodo de la simulación abarca 24 horas, desde la 1:00am del día 9 de noviembre hasta las 0:00am del día 10 de noviembre. La temperatura de bulbo seco oscila entre los 12.25 °C, a las 4:00am, y los 17°C, a las 2:00 y 5:00pm, oscilación de 4.5°C.

Para el caso de la cubierta base, SC1, la temperatura media al exterior fue de 14.62°C mientras que al interior fue de 15.25°C, donde la temperatura más alta al exterior se presenta a las 4:00pm, 19.61°C, mientras que al interior se presenta una hora después a las 5:00pm, 18.55°C, con una oscilación de 1.06°C.

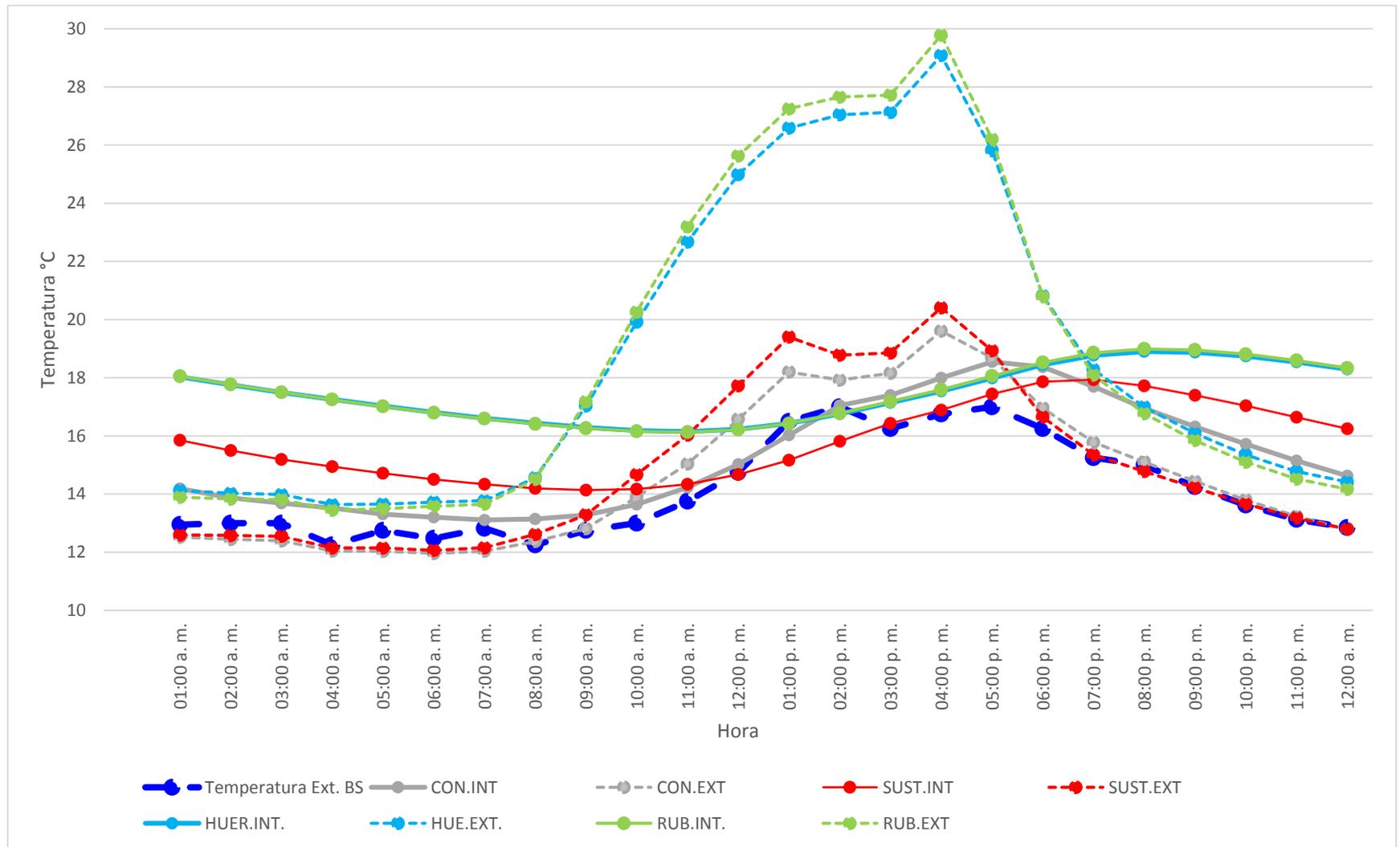
La cubierta con la adición de la capa de sustrato sobre la superficie, SC2, presento temperaturas promedio de 14.90°C en la superficie exterior de la cubierta mientras que al interior se registró un promedio de 15.80°C, en este sistema, la temperatura exterior más alta fue de 20.41°C a las 4:00pm mientras que al interior el registro más elevado fue de 17.94°C a las 7:00pm con una oscilación de 2.47°C.

La azotea con la cubierta con el arreglo basado en hortalizas, SC3, registró una temperatura promedio de 18.69°C al exterior y 17.44°C al interior, la temperatura máxima registrada al exterior de la cubierta fue de 29.08°C a las 4:00pm mientras que al interior la temperatura máxima registrada fue de 18.90°C a las 8:00pm con una oscilación entre estas de 10.18°C.

Por último, la cubierta con un arreglo únicamente de Rubrotintum, SC4, registro una temperatura promedio al exterior de 18.77°C mientras que al interior el promedio fue de 17.47°C, en este caso la temperatura superficial exterior más elevada fue de 29.78°C registrada a las 4:00pm, por su parte al interior se registró una temperatura de 18.99°C a las 8:00pm con una oscilación de 10.79°C de diferencia.

En todos los casos la temperatura máxima registrada al exterior se dio a las 4:00pm, pese a que la temperatura de bulbo seco más elevada se registró a las 5:00pm, estas temperaturas pese haber coincidido en la hora oscilan 10.17°C entre el SC4, siendo esta la superficie con el registro más alto, y la SC1, siendo el sistema que registro la temperatura más baja.

En el caso del SC1 solo hay una diferencia de una hora entre la temperatura exterior más elevada y la temperatura interior máxima al interior del módulo a simular, en los demás casos la diferencia aumenta a 3 horas en el caso del SC2, y 4 horas en los sistemas SC3 y SC4. Siguiendo este comportamiento la diferencia que se registró entre la temperatura exterior e interior, es mayor en los sistemas con vegetación, 10.18°C en el caso SC3 y 10.79°C para el SC4, mientras que para el SC1 y SC2 la diferencia fue de 1.06°C y 2.47°C respectivamente. A continuación, se presenta la tabla de resultados de las temperatura superficial interior y exterior obtenida en la simulación en los distintos sistemas al igual que la gráfica correspondiente:



Gráfica 23 Comparación entre la temperatura superficial del interior y exterior de la cubierta en el día típico periodo frío, 9 de noviembre

Hora	SC1			SC2			SC3			SC4		
	TSI	TSE	OSC	TSI(°C)	TSE	OSC	TSI	TSE	OSC	TSI	TSE	OSC
01:00	14.19	12.52	1.67	15.85	12.59	3.26	18.03	14.12	3.91	18.05	13.89	4.16
02:00	13.88	12.45	1.43	15.49	12.58	2.92	17.76	14.03	3.73	17.77	13.83	3.93
03:00	13.68	12.39	1.29	15.19	12.55	2.65	17.50	13.98	3.51	17.50	13.81	3.69
04:00	13.52	12.04	1.48	14.95	12.14	2.80	17.25	13.64	3.61	17.25	13.45	3.80
05:00	13.31	12.03	1.27	14.72	12.15	2.57	17.02	13.65	3.37	17.01	13.50	3.52
06:00	13.20	11.96	1.24	14.51	12.06	2.44	16.81	13.72	3.08	16.79	13.58	3.21
07:00	13.11	12.04	1.07	14.33	12.16	2.18	16.61	13.77	2.84	16.59	13.65	2.94
08:00	13.14	12.37	0.77	14.20	12.61	1.59	16.44	14.56	1.88	16.41	14.51	1.90
09:00	13.29	12.81	0.47	14.14	13.28	0.85	16.29	17.03	-0.74	16.26	17.17	-0.91
10:00	13.64	13.90	-0.26	14.17	14.67	-0.50	16.18	19.91	-3.73	16.15	20.26	-4.10
11:00	14.23	15.04	-0.81	14.34	16.03	-1.69	16.15	22.67	-6.52	16.13	23.20	-7.07
12:00	15.02	16.57	-1.55	14.67	17.72	-3.05	16.23	24.99	-8.76	16.21	25.63	-9.42
13:00	16.03	18.20	-2.18	15.17	19.40	-4.24	16.43	26.59	-10.16	16.43	27.25	-10.82
14:00	17.05	17.92	-0.87	15.82	18.78	-2.96	16.76	27.04	-10.29	16.78	27.66	-10.88
15:00	17.39	18.16	-0.76	16.43	18.86	-2.43	17.15	27.12	-9.98	17.18	27.72	-10.53
16:00	17.99	19.61	-1.61	16.89	20.41	-3.52	17.54	29.08	-11.55	17.59	29.78	-12.19
17:00	18.55	18.68	-0.13	17.44	18.93	-1.49	17.99	25.82	-7.83	18.06	26.20	-8.14
18:00	18.38	16.96	1.42	17.86	16.65	1.21	18.44	20.82	-2.37	18.53	20.79	-2.26
19:00	17.69	15.78	1.91	17.94	15.35	2.59	18.77	18.28	0.48	18.86	18.09	0.76
20:00	16.95	15.11	1.84	17.73	14.78	2.95	18.90	16.99	1.91	18.99	16.77	2.22
21:00	16.32	14.44	1.88	17.40	14.22	3.18	18.88	16.08	2.79	18.95	15.85	3.11
22:00	15.71	13.79	1.92	17.04	13.66	3.38	18.74	15.35	3.39	18.81	15.10	3.71
23:00	15.15	13.24	1.91	16.65	13.18	3.47	18.54	14.78	3.77	18.59	14.52	4.07
00:00	14.63	12.79	1.84	16.24	12.79	3.45	18.29	14.42	3.88	18.33	14.17	4.16
TM	15.25	14.62		15.80	14.90		17.44	18.69		17.47	18.77	
AMRT	1.038			0.909			0.969			0.953		

Tabla 13 Comparación entre la temperatura superficial del interior y exterior de la cubierta en el día típico periodo frío

SC1: Sistema de losa de concreto armado, módulo de control

SC2: Sistema de losa de concreto armado con capa de sustrato sin vegetación

SC3: Sistema de losa de concreto armado y sistema de cubierta vegetal con arreglo de hortalizas

SC4: Sistema de losa de concreto armado y sistema de cubierta vegetal con arreglo de rubrotintum

T.S.I.: Temperatura superficial al interior de la losa °C

T.S.E.: Temperatura superficial al exterior de la losa °C

OSC: Oscilación en °C

T. PROM: Temperatura promedio

AMRT: Amortiguamiento en °C del periodo más crítico y es resultado de la división de la temperatura máxima interior entre la temperatura máxima exterior

7.3.3 Caso 3 consumo energético anual por uso de equipos de aire acondicionado y calefacción.

Como se mencionó antes para poder establecer los parámetros que debía de seguir los equipos de aire acondicionado y calefacción se determinó una zona de confort de acuerdo a la fórmula de Auliciems con base en la temperatura media anual que es de 16.85°C, lo que nos da una temperatura neutra de 22.82°C lo que deriva en una zona de confort de 25.32°C como máximo y 20.32°C como mínimo.

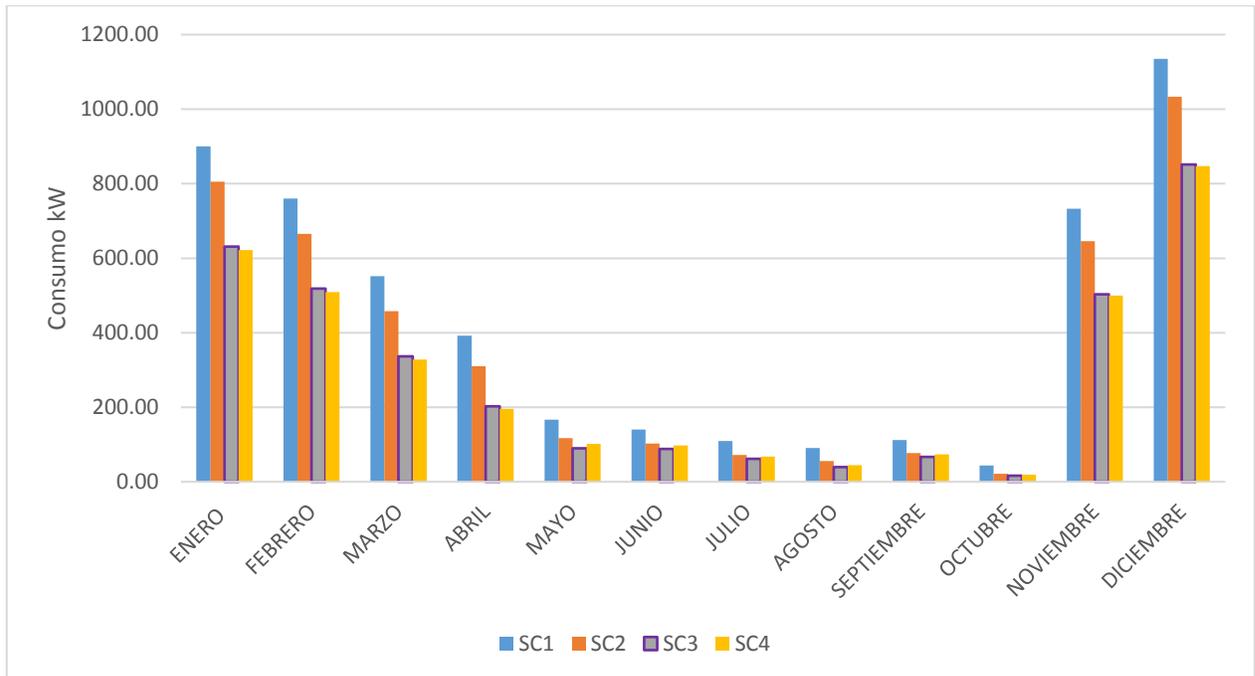
Por lo que la consigna para el equipo de aire acondicionado y el equipo de calefacción se estableció en 21°C mínimo y 24°C máximo. Se utilizo un sistema de aire acondicionado de paquete preestablecido por el mismo programa.

La simulación arrojó los siguientes resultados:

Todos los módulos de simulación utilizaron tanto calefacción como aire acondicionado, en los cuatro casos se utilizaron durante los mismos periodos, el aire acondicionado se utilizó durante los meses de mayo a octubre, mientras que fue necesario calentar el espacio al interior del espacio en dos periodos, de enero al mes de abril y noviembre y diciembre. El mes en el que el sistema de calefacción fue más utilizado fue el mes de diciembre y el mes de menor consumo en este aspecto fue abril, por su parte el aire acondicionado presento su pico más alto de consumo el mes de mayo y el de menor consumo fue el mes de octubre, el anterior comportamiento fue el mismo con los 4 sistemas de cubiertas.

Mes	Consumo kW hora mes			
	SC1	SC2	SC3	SC4
ENERO	900.20	805.79	631.17	621.87
FEBRERO	760.19	665.46	518.26	509.23
MARZO	552.13	457.57	336.82	327.87
ABRIL	392.16	310.35	202.90	195.47
MAYO	166.29	117.44	90.17	102.19
JUNIO	140.61	102.32	88.20	97.85
JULIO	109.36	72.10	61.71	67.40
AGOSTO	91.04	55.45	39.46	44.25
SEPTIEMBRE	111.94	77.32	67.06	73.71
OCTUBRE	44.07	21.39	16.72	19.29
NOVIEMBRE	732.92	645.28	503.39	499.66
DICIEMBRE	1134.69	1033.01	851.37	847.36

Tabla 14 Consumo mensual en kW



Gráfica 24 Consumo mensual en kW

El consumo anual en kW de cada sistema fue el siguiente:

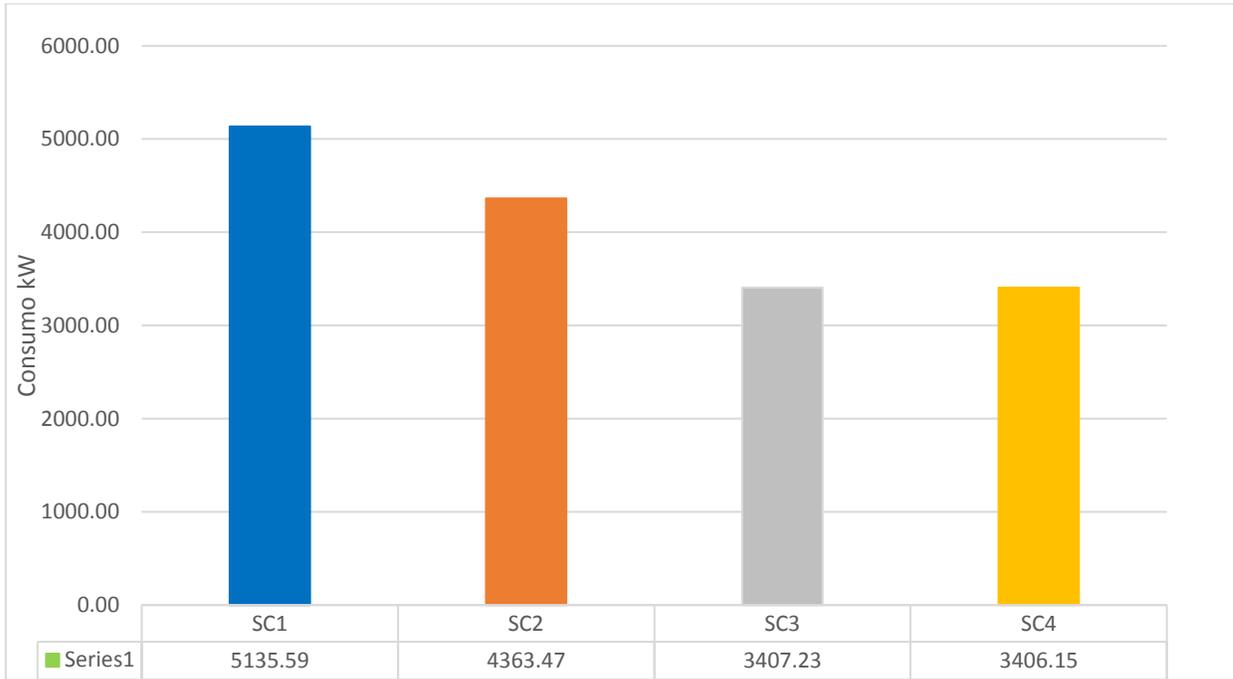
SC1: El consumo total anual fue de 5135.59 kW de los cuales 4472.29 se utilizaron en calefacción y 663.30kW en aire acondicionado

SC2: El consumo total anual en el caso de la cubierta con la capa de sustrato fue de 4363.47 kW de los cuales 3917.46 kW se utilizaron en calefacción y 446.02 kW en aire acondicionado

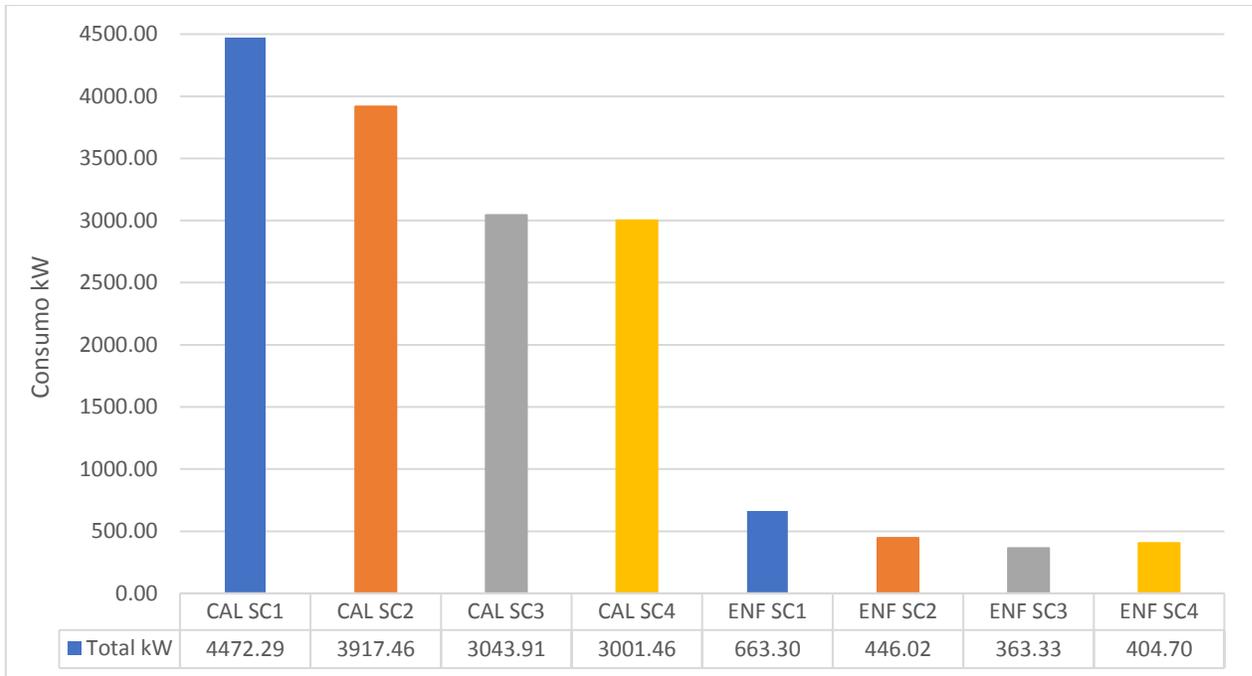
SC3: El consumo total anual fue de 3407.23 kW de los cuales 3043.91 kW fueron utilizados en calefacción y de 363.33kW en aire acondicionado

SC4: El consumo total anual fue de 3406.15 kW, muy similar a la otra cubierta vegetal, de este total 3001.46 kW fueron utilizados en calefacción mientras que 404.70kW se utilizaron en refrigeración

Se puede observar que todos los sistemas se ven más beneficiados durante el periodo cálido y aunque en todos los módulos fue necesario la intervención de la calefacción como de enfriamiento, las cubiertas conformadas por arreglos vegetales, presentaron un consumo 34% menos que la azotea en la que no hubo ninguna intervención.



Gráfica 25 Consumo anual en kW de cada sistema de cubierta



Gráfica 26 Consumo anual en kW de cada sistema, calefacción y enfriamiento

8 Síntesis de resultados

8.1 Síntesis y discusión de resultados

Para poder determinar la eficiencia energética de un sistema de azotea verde que cumpla la función de huerto la presente investigación siguió principalmente dos procedimientos.

El primero de estos procedimientos se llevó a cabo en las instalaciones del simulador de radiación solar, al interior del laboratorio de termo fluidos de la UAM Azc, la prueba consistió en exponer a niveles de radiación constante, durante periodos prolongados de tiempo, tres arreglos vegetales distintos, con el objetivo de poder monitorear y registrar el flujo de calor en condiciones de ambiente controlado, en donde la única variable entre los distintos sistemas a monitorear fuera la capa vegetal.

Para lo anterior fue necesario realizar adecuaciones a la estructura del simulador, añadiendo una cubierta aislante hecha de poliestireno expandido, capaz de contener los arreglos vegetales y evitar intercambios térmicos ajenos a la radiación proporcionada por el arreglo de luminarios, se agregó también una base fría para que el intercambio térmico se produjera de manera más rápida al igual que se añadieron al conjunto de lámparas existentes, quince lámparas fluorescentes las cuales permitieron alcanzar los niveles de radiación PAR, importantes para los procesos metabólicos de las plantas. Todo lo anterior considerando en que la vegetación no es un material inerte y que el metabolismo de la misma está relacionado con la eficiencia del sistema.

El monitoreo se realizó con termopares colocados en la parte superior de la cobertura vegetal, para registrar la temperatura de entrada al sistema, en la superficie de la cama de sustrato, con el fin de observar el amortiguamiento térmico realizado únicamente por el follaje de la vegetación, y por último debajo del sustrato. Los resultados del monitoreo de las temperaturas arrojaron los siguientes resultados:

Arreglo vegetal	Únicamente sustrato en punto de marchitez (12cm) SC2		
Inicio de la prueba		Final de la prueba	
T prom. entrada °C	T prom. salida °C	T prom. entrada °C	T prom. salida °C
18.73	17.22	37.32	34.71

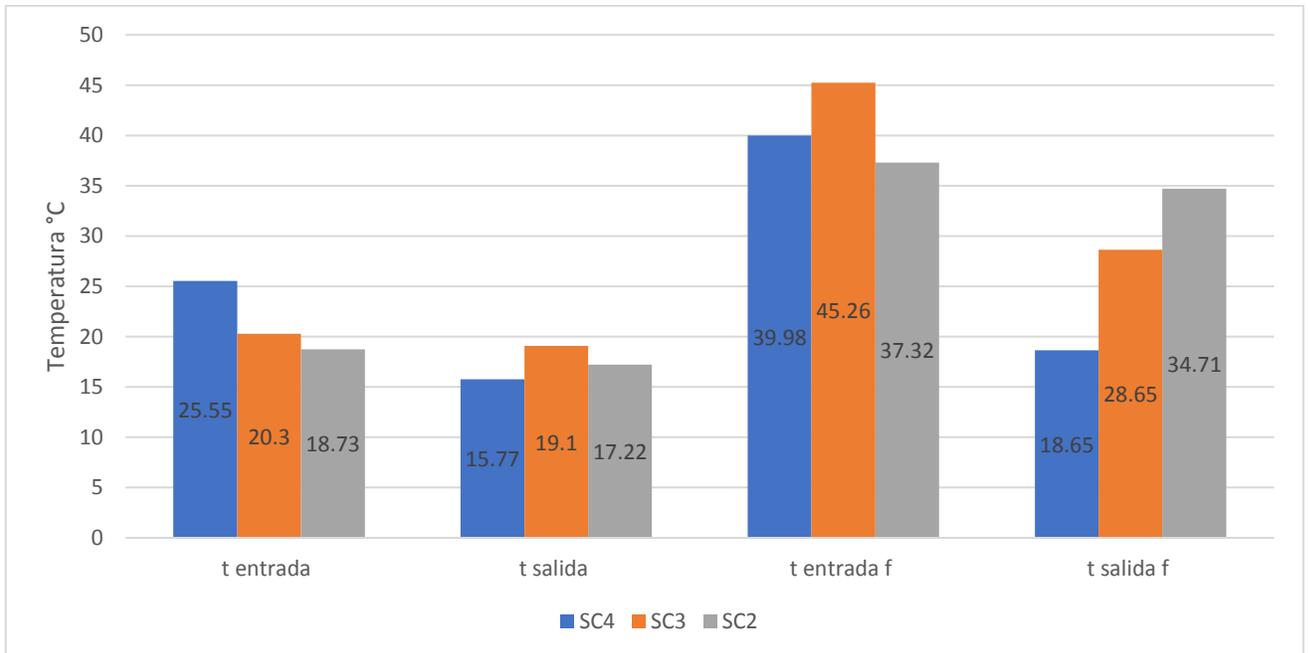
Tabla 15 Comparativa temperatura en el inicio y final de la prueba del simulador de radiación solar (SC2)

Arreglo vegetal	Hortalizas SC3		
Inicio de la prueba		Final de la prueba	
T prom. entrada °C	T prom. salida °C	T prom. entrada °C	T prom. salida °C
25.55	15.77	39.98	18.65

Tabla 16 Comparativa temperatura en el inicio y final de la prueba del simulador de radiación solar (SC3)

Arreglo vegetal	Rubrotintum SC4		
Inicio de la prueba		Final de la prueba	
T prom. entrada °C	T prom. salida °C	T prom. entrada °C	T prom. salida °C
20.30	19.10	45.26	28.65

Tabla 17 Comparativa temperatura en el inicio y final de la prueba del simulador de radiación solar (SC4)



Gráfica 27 Comparativo prueba realizada en el simulador de radiación solar

El segundo proceso consistió en simular con un modelo numérico, con ayuda del software Design Builder cuya plataforma de cálculo es ENERGY PLUS, un espacio teórico, térmicamente aislado, que representara una construcción con base 14.138m² con una cubierta de concreto armado de 0.1m de espesor y un sistema de muros conformado de tres capas: mortero premezclado, 0.01m, bloc concreto, 0.1m, empastado de yeso, 0.01m, en donde la única modificación que se realizó en el modelo fue anexando la cubierta de sustrato y las cubiertas de arreglos vegetales.

Este procedimiento tuvo como fin determinar los beneficios o desventajas térmicas que una cubierta vegetal, en este caso con especies consumibles, puede brindar contra un sistema muestra.

Se realizaron simulaciones con los 4 distintos sistemas de cubiertas en tres distintos periodos, el primero fue una simulación correspondiente al día típico del periodo cálido, 20 de mayo, el segundo periodo fue en el día típico del periodo frío, 9 de noviembre, estas dos simulaciones se realizaron con los modelos sin

equipos de aire acondicionado o calefacción, esto con el fin de que la única variable dentro de la simulación fuera las ganancias o pérdidas a través de la cubierta, el último periodo simuló todos los sistemas durante un año completo, pero en esta ocasión los modelos fueron equipados con sistemas de aire acondicionado y calefacción, sistemas basados en la zona de confort obtenida por la fórmula de Auliciems, esto con el motivo de observar la diferencia en el consumo de energía en este tipo de equipos al modificar la cubierta del modelo

Temperatura media anual	16.85 °C
Temperatura neutra	22.82 °C
Zona de confort	25.32 °C
	20.32 °C

Tabla 18 Zona de confort de acuerdo a temperatura media anual Dia típico del periodo cálido

Los sistemas con cubiertas vegetales (sc3 y SC4) presentaron las temperaturas al exterior más elevadas siendo 50.26°C y 51.10 °C, pese a que estos sistemas presentaron las temperaturas exteriores más elevadas al interior la temperatura no sobre paso los 27°C a diferencia de los otros dos sistemas donde el interior alcanzo los 36.44°C en el caso del SC1 y los 28.11 en el caso del SC2

Es importante remarcar que la temperatura más elevada al interior del SC1 se presentó dos horas antes de que la temperatura exterior del mismo sistema alcanzara su punto más alto. Por su parte el sistema con la cubierta de sustrato mostró una diferencia de 4 horas mientras que la diferencia en los sistemas de azoteas verdes fue de 6 horas en el caso del SC3 y 7 horas en el caso del SC4, mencionar que al contrario del SC1 los picos al interior se presentaron después de que se presentara el registro más elevado en el exterior

La siguiente tabla muestra los horarios en los que se presentaron las temperaturas más elevadas en cada sistema

Hora	SC1			SC2			SC3			SC4		
	TSI	TSE	OSC									
13:00	33.97	25.92	-8.05	21.16	36.94	15.79	21.42	50.26	28.84	21.46	51.10	29.64
14:00	36.05	28.79	-7.26	23.10	38.66	15.56	22.32	48.72	26.40	22.39	50.21	27.83
15:00	36.44	30.81	-5.63	25.05	38.33	13.29	23.33	45.20	21.87	23.42	47.18	23.76
16:00	33.60	31.53	-2.07	26.71	34.25	7.54	24.36	39.33	14.96	24.49	41.02	16.54
17:00	30.75	30.87	0.12	27.76	30.76	3.01	25.29	34.88	9.60	25.45	36.22	10.77
18:00	27.62	29.50	1.88	28.11	27.21	-0.90	25.96	30.29	4.32	26.16	31.21	5.05
19:00	21.73	27.26	5.53	27.85	20.76	-7.09	26.34	26.48	0.14	26.57	26.85	0.29
20:00	19.86	24.26	4.41	26.83	19.33	-7.50	26.32	23.74	-2.58	26.57	23.88	-2.69

Tabla 19 Horarios en los que se presentaron las temperaturas más elevadas

SC1: Sistema de losa de concreto armado, módulo de control

SC2: Sistema de losa de concreto armado con capa de sustrato sin vegetación

SC3: Sistema de losa de concreto armado y sistema de cubierta vegetal con arreglo de hortalizas

SC4: Sistema de losa de concreto armado y sistema de cubierta vegetal con arreglo de rubrotintum

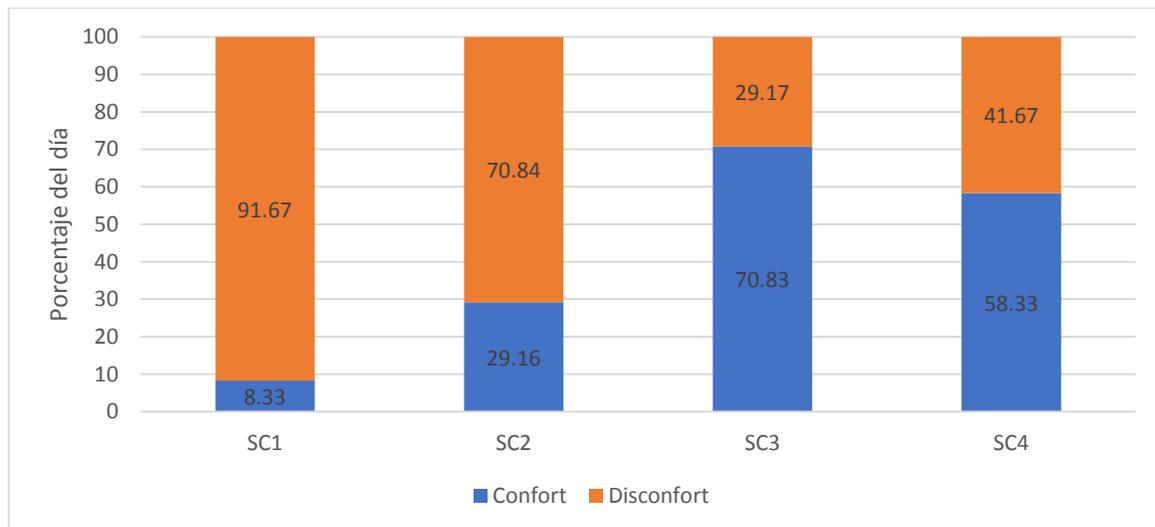
T.S.I.: Temperatura superficial al interior de la losa °C

T.S.E.: Temperatura superficial al exterior de la losa °C

OSC: Oscilación en °C

La temperatura media del día al interior de todos los sistemas se encuentra dentro del rango de confort, sin embargo, de acuerdo a los registros a cada hora el SC3 y SC4 fueron los módulos en los que se presentaron más horas en confort

- SC1: 2 horas (10:00 y 19:00) 8.33% de las horas del día se encuentra en confort
- SC2: 7 horas (01:00, 13:00-15:00 y 22:00-00:00) 29.16% de las horas del día se encuentra en confort
- SC3: 17 horas (1:00-7:00, 12:00-18:00 y 22:00 -00:00) 70.83% de las horas del día se encuentra en confort
- SC4: 14 horas (1:00-7:00, 12:00-16:00 y 23:00-00:00) 58.33% de las horas del día se encuentra en confort



Gráfica 28 Porcentaje del día en confort

Día típico periodo frío

Los sistemas con cubiertas vegetales, SC3 y SC4, presentaron las temperaturas al exterior más elevadas, coincidentemente a las 16:00 horas en ambos casos, siendo 29.08°C y 29.78 °C, respectivamente, mientras que al interior se registraron 18.90°C y 18.99°C como las temperaturas más altas en estos sistemas.

Los otros dos sistemas registraron a igual hora su temperatura más elevada al exterior siendo 19.61°C en el caso del SC1 y 20.41°C para el SC2, pese a esto los sistemas de azoteas verdes registran su temperatura más alta al interior 4 horas después mientras que la cubierta de concreto y la azotea con la capa de sustrato tardan 1 y 4 horas respectivamente

La siguiente tabla muestra los horarios en los que se presentaron las temperaturas más elevadas en cada sistema

Hora	SC1			SC2			SC3			SC4		
	TSI	TSE	OSC	TSI	TSE	OSC	TSI	TSE	OSC	TSI	TSE	OSC
16:00	17.99	19.61	-1.61	16.89	20.41	-3.52	17.54	29.08	-11.55	17.59	29.78	-12.19
17:00	18.55	18.68	-0.13	17.44	18.93	-1.49	17.99	25.82	-7.83	18.06	26.20	-8.14
18:00	18.38	16.96	1.42	17.86	16.65	1.21	18.44	20.82	-2.37	18.53	20.79	-2.26
19:00	17.69	15.78	1.91	17.94	15.35	2.59	18.77	18.28	0.48	18.86	18.09	0.76
20:00	16.95	15.11	1.84	17.73	14.78	2.95	18.90	16.99	1.91	18.99	16.77	2.22

Tabla 20 Horarios en los que se presentaron las temperaturas más elevadas

La temperatura media del día al interior de todos los sistemas se encuentra fuera del rango de confort, así mismo podemos observar también que en los registros horarios ninguno de los sistemas se encuentra ni siquiera una hora dentro de la zona de confort.

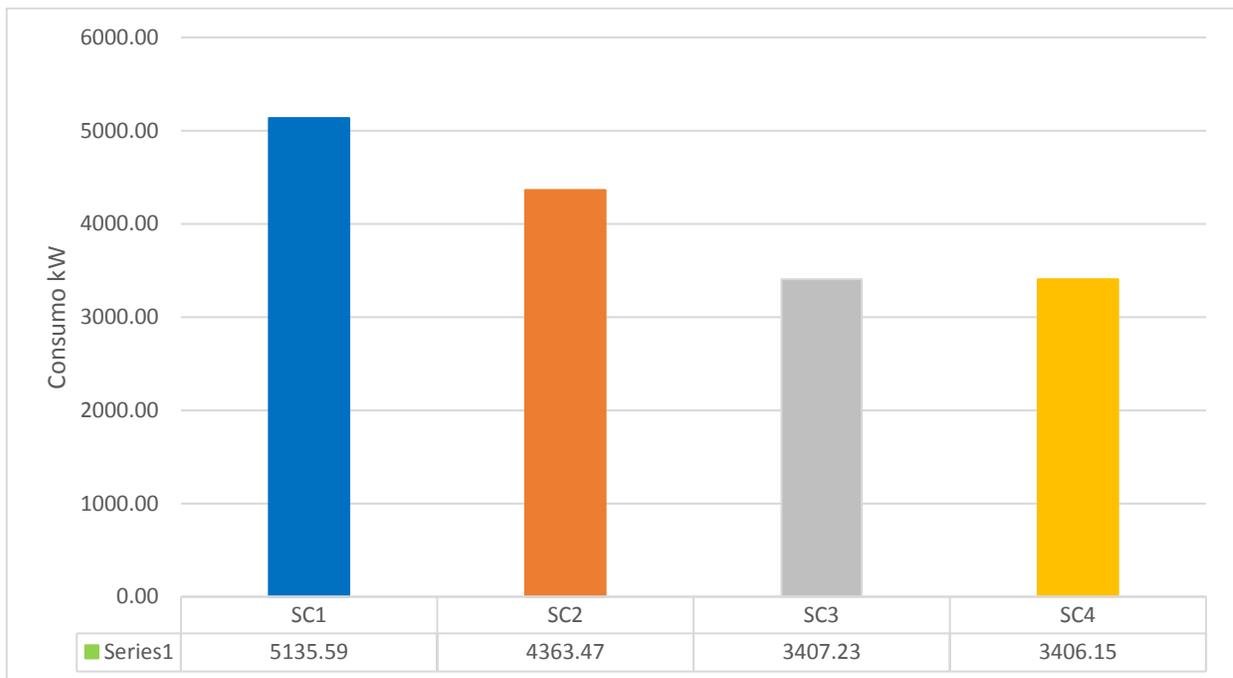
Consumo energético anual.

El mes en el que el sistema de calefacción fue más utilizado fue el mes de diciembre y el mes de menor consumo en este aspecto fue abril

Por su parte el aire acondicionado presentó su pico más alto de consumo el mes de mayo y el de menor consumo fue el mes de octubre

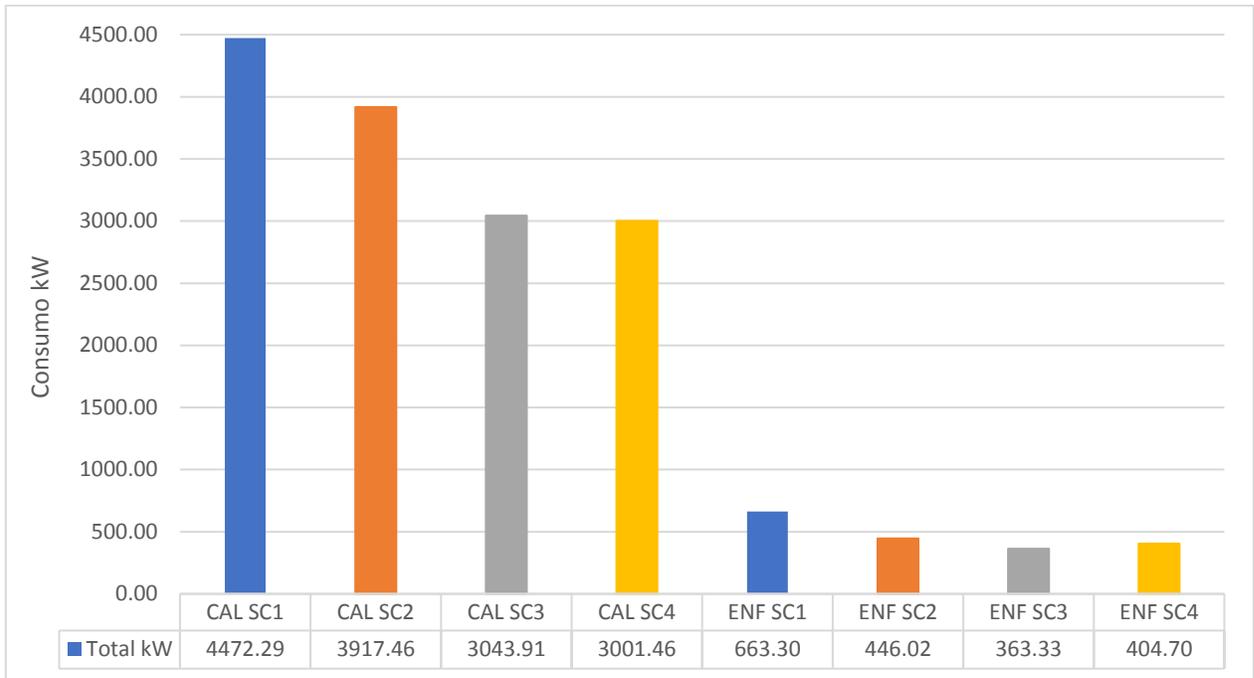
Mes	Consumo kW hora mes			
	SC1	SC2	SC3	SC4
ABRIL	392.16	310.35	202.90	195.47
MAYO	166.29	117.44	90.17	102.19
OCTUBRE	44.07	21.39	16.72	19.29
DICIEMBRE	1134.69	1033.01	851.37	847.36

Gráfica 29 Meses de mayor y menor consumo en kW



Gráfica 30 Consumo anual en kW de cada sistema de cubierta

Los sistemas de con vegetación presentaron un ahorro de 33.65% en el caso de del SC3 y 33.68% en el caso del SC4 mientras que el SC2 presento un ahorro del 15.03% tomando como parámetro el consumo generado en el SC1.



Gráfica 31 Consumo anual en kW de cada sistema, calefacción y enfriamiento

El ahorro energético es mayor en el consumo de aire acondicionado, en el caso del SC3 hay un ahorro de 45.22% y de 38.99% en el caso del SC4, por su parte el SC2 presento un ahorro del 32.76 por su parte el ahorro por consumo en calefacción fue de 31.94% en el caso de SC3 y 32.89% en el SC4 por su parte el SC2 presento un ahorro del 12.41% con respecto al SC1.

9 Conclusiones de la investigación

9.1 Conclusiones

Aun cuando en la actualidad ya existen distintos modelos y mediciones relacionados a la transferencia térmica en sistemas de azoteas verdes, los cuales permiten cuantificar los aportes que este tipo de soluciones aportan al proyecto arquitectónico, no se habían determinado valores térmicos que un techo verde que cumpla como un huerto urbano pueda brindar. La aplicación de un sistema integrado como el ya mencionado no solo buscan la generación de espacios verdes a la vez promueven la producción y el abastecimiento de productos frescos para los usuarios que adoptan esta clase de soluciones mientras que se obtienen beneficios térmicos mayores a los de una cubierta tradicional.

De los tres arreglos vegetales conformados en un principio de la investigación, únicamente dos de ellos, el SC3, arreglo conformado por lechuga, acelga y cebolla cambray, así como el SC4 formado únicamente por rubrotintum, fueron aptos para ser utilizados como cubierta vegetal en un sistema de azotea verde, lo anterior debido a que al ser expuestos a condiciones naturales fueron capaces de desarrollarse sin la necesidad de cuidados especiales y al momento de ser expuestos a radiación constante en el simulador de radiación solar, pese a si sufrir alteraciones debido al periodo prolongado al que estos fueron expuestos, estos pudieron recuperarse a diferencia del arreglo conformado por yerbabuena y manzanilla el cual resulto en pérdida total.

Dentro de mismo ámbito, el uso de un sistema de charolas de cultivo modular facilito el manejo de las especies durante las distintas etapas de crecimiento de la planta, hecho que aumenta la eficiencia del sistema, puesto que mientras una sección puede encontrarse en crecimiento, charolas independientes en estado maduro pueden cumplir con la función de cobertura para la azotea hasta ser recolectadas.

Siguiendo el acomodo recomendado por el manual para “El huerto familiar biointensivo” en 1m^2 se pueden cosechar entre 33 y 35 sujetos. Tomando en cuenta lo anterior y que el precio comercial en supermercados locales ronda en un promedio de 15.00MN cada producto, costo a la fecha de la elaboración del presente documento, la ganancia de la venta del total del cultivo oscilaría entre los 495.00MN y los 525.00MN lo que representaría una ganancia de entre 195.00MN Y 225.00MN, de acuerdo al costo de mantenimiento promedio que se estima para un sistema de una azotea verde tradicional, que es de 300.00MN por metro cuadrado tomando en cuenta riego tecnificado.

Por lo que podemos determinar que una azotea verde, que siga el acomodo presentado en el manual para “El huerto familiar biointensivo”, utilizando las especies sugeridas por la presente investigación, es económicamente eficiente al brindar una ganancia neta estimada de entre 195.00MN Y 225.00MN por m^2 .

De acuerdo a las pruebas realizadas durante periodos prolongados de tiempo en el simulador de radiación solar, en donde bajo condiciones de ambiente controlado, donde la capa de sustrato utilizado en los arreglos se encontraba en su punto de marchitez, se pudo observar que:

El uso de una cubierta vegetal con especies comestibles es térmicamente eficiente como capa vegetal de un sistema de azotea verde, siempre y cuando la cobertura proporcionada por el follaje de la vegetación sea densa de lo contrario el sustrato queda expuesto directamente a la radiación solar. Para compensar lo anterior, el uso de especies como la cebolla cambray ayudan al sistema al proporcionar un volumen de agua al interior del sustrato lo que compensa su bajo factor de cobertura.

El punto anterior demuestra de igual manera que los beneficios térmicos que una azotea verde puede brindar no son únicamente brindados por el sustrato, la capa correspondiente a las plantas tiene una gran labor al momento de reducir el flujo térmico.

Con los resultados obtenidos durante el monitoreo en el simulador de radiación solar se calculó la conductividad de los dos arreglos con cobertura vegetal, este cálculo se realizó siguiendo dos métodos el primero siguiendo la ecuación propuesta por Givoni para determinar la conductividad de un arreglo vegetal, el segundo consistió en un método simplificado el cual consiste en aplicar la siguiente ecuación, $e \cdot q / A \cdot \Delta t$, a todos los Δt obtenidos durante el periodo de prueba.

Al comparar ambos métodos los resultados son prácticamente idénticos con una variación de .016 en el caso del SC3 y de .003 para el SC4, ambos casos diferencias despreciables por lo que el método simplificado para estos dos casos resulta igualmente eficiente que la ecuación propuesta por Givoni con el beneficio de que la información necesaria para resolverla es menor.

La parte final de la metodología presentada en este documento consistió en realizar un análisis de transferencia térmica mediante modelos de simulación numérica, ENERGY PLUS a través de la plataforma de Design Builder. Los resultados arrojados en esta etapa final permiten concluir que:

De los dos arreglos útiles para las pruebas en el simulador, la capa vegetal correspondiente al SC3 fue la más eficiente ya que con una temperatura superficial externa promedio de 27.98°C la temperatura superficial al interior promedio fue de 22.94°C sin embargo, la misma superficie exterior alcanzó temperaturas mayores a los 50°C sin embargo la temperatura máxima registrada fue 26.57°C esto demuestra que el arreglo de hortaliza no solo es capaz de brindar beneficios térmicos en comparación a un sistema sin intervenir, sino que también fue un sistema con vegetación prácticamente igual de efectivo, en lo relacionado en transferencia térmica, que el SC4 conformado únicamente de rubrotintum

Es importante señalar que para entender de manera correcta el comportamiento térmico de los sistemas de azoteas verdes es necesarios realizar la simulación en el día típico del periodo puesto que, al realizar

la simulación durante un periodo más amplio, el promedio de resultados no permite ver el comportamiento real de la cubierta.

El SC3 fue la cubierta térmica más eficiente, en relación del SC1 (cubierta de control) por ser la que permitió que las temperaturas al interior del espacio planteado se encontraran durante mayor tiempo dentro del área de confort, 17 horas lo que representa el 70.83% de las horas del día en comparación del 8.33%, dos horas, del sistema de control.

Mismo comportamiento que se ve reflejado en un menor consumo emergentico al momento de que se incorporara a la simulación equipos de climatización mecánica siendo junto con el SC4 los que presentaron mayor ahorro energético principalmente en los equipos de aire acondicionado. Los sistemas de con vegetación presentaron un ahorro de 33.65% en el caso de del SC3 y 33.68% en el caso del SC4 mientras que el SC2 presento un ahorro del 15.03% tomando como parámetro el consumo generado en el SC1.

Es importante remarcar que de acuerdo a lo observado durante las pruebas en el laboratorio de radiación solar y los resultados derivados del monitoreo de las muestras en el mismo se determina que el modelo de simulación numérica que se asemeja más al comportamiento real es el modelo de ENERGY PLUS.

Al finalizar la metodología presentada en este documento se puede determinar que, bajo las condiciones especificadas en el mismo, la hipótesis planteada se cumple, puesto que en todos los casos las cubiertas intervenidas con arreglos vegetales correspondientes a un huerto brindan beneficios para el confort térmico al interior del espacio, y son capaces también de brindar beneficios económicos a los usuarios no solamente mediante el ahorro de energía en equipos de calefacción o de aire acondicionado sino con la venta de productos cultivados en el mismo espacio.

Correspondería para estudios posteriores bajo el mismo eje de investigación determinar los beneficios que la intervención de este tipo de sistemas pueda brindar a otro tipo de sistemas constructivos, bajo condiciones climáticas diferentes.

Del mismo modo existe la posibilidad de realizar un análisis similar involucrando arreglos vegetales con especies distintas, sean o no representativas de la región donde se haga el estudio y determinar así los beneficios o desventajas que estos puedan proporcionar al sistema.

Por último, se considera que esta investigación representa un aporte al diseño arquitectónico puesto que brinda de manera cuantitativa un nuevo enfoque al uso tanto de azoteas, así como de los espacios ajardinados, ambos aspectos importantes en una ciudad en constante crecimiento demográfico y en donde cada vez las áreas verdes y el abasto de alimentos es menor.

-
- Inda-Gro. USA. (2010). <http://www.inda-gro.com/IG/?q=node/53>. Obtenido de <http://www.inda-gro.com/IG/?q=node/53>
- azoteas verdes. (s.f.). azoteasverdes.com.mx. Recuperado el 02 de diciembre de 2015, de <http://azoteasverdes.com.mx/wp/precios/>
- azoteas verdes. (s.f.). <http://azoteasverdes.com.mx>. Recuperado el 2016, de <http://azoteasverdes.com.mx/wp/precios/>
- Barrio, D. (1998). Analysis of the green roofs cooling potential in buildings *Energy and Buildings*.
- Brad Bass, A. &. (noviembre de 2005). <http://www.news.utoronto.ca>. Recuperado el marzo de 2017, de <https://web.archive.org/web/20080411230309/http://www.news.utoronto.ca/bin6/051117-1822.asp>
- Brooklyn Grange Rooftop Farm. (2005). brooklyngrangefarm.com. Recuperado el 02 de diciembre de 2015, de <http://brooklyngrangefarm.com/about/>
- Centro Agroecológico Las Cañadas -bosque de niebla. (s.f.). <http://www.tierramor.org>. Recuperado el 2016, de <http://www.tierramor.org/PDF-Docs/ManualHuertoBiointensivo.pdf>
- Centro de Agricultura Urbana Romita. (s.f.). huertoromita.com. Recuperado el 02 de diciembre de 2015, de <http://www.huertoromita.com/#!/somos/c1prb>
- Ciencia y Biología. (2010). <http://cienciaybiologia.com>. Obtenido de <http://cienciaybiologia.com/adaptaciones-de-las-plantas-al-medio-ecomorfologia-del-cormo/>
- civil geeks. (s.f.). <http://civilgeeks.com>. Recuperado el 2016, de <http://civilgeeks.com/2011/09/19/caracterizacion-fisica-del-suelo-para-el-riego/>
- Clark, C. P. (2008). <https://www.epa.gov/>. Obtenido de <https://www.epa.gov/heat-islands/using-green-roofs-reduce-heat-islands#4>
- COLUMBIA GREEN TECHNOLOGIES. (s.f.). <http://columbia-green.com>. Recuperado el 2017, de http://columbia-green.com/wp-content/uploads/2014/08/CGT_Maintenance_July2014.pdf
- DesignBuilder Software Ltd. (s.f.). <https://designbuilder.co.uk/>. Recuperado el 2017, de <https://designbuilder.co.uk/>
- Deutschen Dachgärtner Verband e.V.! (s.f.). <http://www.dachgaertnerverband.de/>. Obtenido de <http://www.dachgaertnerverband.de/>
- Dr. Doug Banting, P. H. (2005). *Report on the Environmental Benefits and Cost of Green Roof Technology for the City of Toronto*. Toronto.
- Edwin Israel Tovar Jimenez, Anibal Figueroa Castrejon, Manuel Gordon Sanchez. (2013). Criteria for selection of plant species for its deployment in. *SciVerse Science Direct*.
- el economista. (2015). eleconomista.com.mx. Recuperado el 02 de diciembre de 2015, de <http://eleconomista.com.mx/entretenimiento/2015/03/03/azotea-verde-mas-grande>
- Eumorfopoulou. (1998). Atenas, Grecia.

- European Federation of Green Roof Associations. (s.f.). *efb-greenroof.eu*. Recuperado el 02 de diciembre de 2015, de <http://www.efb-greenroof.eu/index.html>
- European Federation of Green Roof Associations, s.f. (s.f.). *efb-freenroof.eu*. Recuperado el 02 de diciembre de 2015, de http://www.efb-greenroof.eu/verband/fachbei/fa01_englisch.html
- Flanner, B. (2011). *Brooklyn Grange*. Nueva York.
- Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (2015). *fll.de*. Recuperado el 02 de diciembre de 2015, de http://www.fll.de/shop/home?__store=english&__from_store=german
- Fuentes, V. A. (2004). *Clima y Arquitectura* (1 ed.). Mexico D. F.: Universidad Autonoma Metropolitana Azcapotzalco.
- G., M. (2005). *Tectos verdes, planificación, ejecución, consejos prácticos* (Primera ed.). Montevideo, Uruguay.
- G., M. (2005). *Tectos verdes, planificación, ejecución, consejos prácticos*. (1st ed.). Montevideo, Uruguay: Fin de siglo.
- Givoni, B. (1997). *Climate Considerations in Building and*. Nueva York: Van Nostrand Reinhold.
- Hortilux. (2010).
- Hortilux. . (2010). Obtenido de <http://www.hortilux.nl>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI. (2010). <http://www.censo2010.org.mx>. Recuperado el 2017, de http://web.archive.org/web/20120505010044/http://www.censo2010.org.mx/doc/cpv10p_pres.pdf
- ISO 10456:. (2012). <http://www.aenor.es>. Obtenido de <http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0049362#.Wmj2eK6WbIU>
- J, B. D. (1976). Métodos de Medición del Área Foliar: un estudio de precisión y rapidez. Iowa .
- J., C. (2009). *Diseño térmico de azotea verde en clima cálido subhúmedo*. . México: Tesis de maestría. Posgrado de Arquitectua. UNAM.
- KVDP. (28 de julio de 2014). *wikipedia.org*. Recuperado el 02 de diciembre de 2015, de https://en.wikipedia.org/wiki/Green_roof#/media/File:Intensive_extensive_green_roofs.png
- La Roche P, B. U. (2014). Comfort and energy savings with active green roofs. Obtenido de Elsevier. USA. En: <file:///C:/Users/israeltovar/Documents/UAM/ESTUDIOS-ARQ-BIO-XIV-2018/ARTICULOS/ARTICULOS-ISRAEL-EAB-XIV-2018/Ecoroofs-Berardi%20y%20La%20Roche.pdf>. A
- Las Cañadas Centro Agroecológico. (s.f.). *tierramor.org*. Recuperado el 08 de diciembre de 2015, de <http://www.tierramor.org/PDF-Docs/ManualHuertoBiointensivo.pdf>
- Mária Machado, C. B. (1999). *LA CUBIERTA ECOLÓGICA COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN*.
- Notimex El Universal. (06 de Abril de 2012). Ciudad de México , la tercera más poblada del mundo: ONU. *El Universal* , pág. <http://archivo.eluniversal.com.mx/notas/840091.html>.

- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2011). <http://www.fao.org/>. Recuperado el 2017, de <http://www.fao.org/3/a-as163s.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO. (s.f.). [fao.org](http://www.fao.org/). Recuperado el 02 de diciembre de 2015, de <http://www.fao.org/urban-agriculture/es/>
- Ortega A, M. D. (2012). Entrevista personal. Facultad de Arquitectura UNAM.
- P., T.-V. (2012). www.elsevier.com/. Obtenido de www.elsevier.com/locate/ecoleng.
- Penn State Center for Green Roof Research. (2008). *pennstate web archive*. Recuperado el 02 de Diciembre de 2015, de <http://web.archive.org/web/20080511235433/http://hortweb.cas.psu.edu/research/greenroofcenter/history.html>
- rain garden network. (2003). [raingardennetwork.com](http://www.raingardennetwork.com). Recuperado el 02 de diciembre de 2015, de <http://www.raingardennetwork.com/greenroofs.htm>
- Sailor D, S. G. (2008). A Green Roof Energy Calculator. *National Green Building Research Agenda. U S Green Building Council* .
- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT. (2013). semarnat.gob.mx. Recuperado el 08 de diciembre de 2015, de http://www.semarnat.gob.mx/sites/default/files/documentos/educacionambiental/publicaciones/el_huerto_familiar.pdf
- Secretaria Del Medio Ambiente CDMX . (2017). <http://data.sedema.cdmx.gob.mx>. Obtenido de <http://data.sedema.cdmx.gob.mx/educacionambiental/index.php/talleres/talleres-huertos-urbanos-cdmx-2016>
- Secretaria Del Medio Ambiente, SEDEMA, CDMX. (2017). <http://www.aire.cdmx.gob.mx>. Recuperado el 2017, de <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27aqBhnmQ=%27>
- Servicio Meteorológico Nacional, SMN . (1941-1997.). Media Histórica del Observatorio de Tacubaya. Mexico, D. F.:
- U.S. Department of Energy's (DOE) Building Technologies Office (BTO), and managed by the National Renewable Energy Laboratory (NREL). (s.f.). <https://energyplus.net/>. Recuperado el 2017, de <https://energyplus.net/>
- United States Environmental Protection Agency. (s.f.). <https://www.epa.gov>. Recuperado el 17, de <https://www.epa.gov/heat-islands/using-green-roofs-reduce-heat-islands>
- Universidad de Granada. (s.f.). <http://www.ugr.es/>. Recuperado el 2017, de <http://www.ugr.es/~ufut/downloads/EST.TECNICO%20TECHO%20VERDE.pdf>

Tabla 1	Propiedades de los sustratos en un sistema de azoteas verdes (Handreck and Black, s.f.)	15
Tabla 2	Porcentaje de componentes de la muestra del sustrato (mezcla1)	49
Tabla 3	Comparativo de las temperaturas registradas por los termopares al inicio y final de la prueba (placa caliente)	59
Tabla 4	Comparativo de las temperaturas registradas por los termopares al inicio y final de la prueba (placa fria)	60
Tabla 5	Prueba 1 con reflectores infrarrojos de 375 W	62
Tabla 6	Comparativa de niveles de radiación global y radiación PAR	63
Tabla 7	Prueba con lámpara halógena más combinación de 4 lámparas fluorescentes	63
Tabla 8	Equivalencias de trabajo entre Radiación total, RFA y Lux (Hortilux. , 2010)	64
Tabla 9	Datos para resolver ecuación “ Λ ” basada en el modelo de Cálculo de Evolución de Temperaturas Interiores desarrollado por Neila (Mária Machado, 1999)	73
Tabla 10	Área total por arreglo de cada especie y LAI correspondiente	86
Tabla 11	Reflectancia y absortancia de acuerdo a cada especie	88
Tabla 12	Comparación entre la temperatura superficial interior y exterior del día típico del periodo cálido	95
Tabla 14	Consumo mensual en kW	101
Tabla 15	Comparativa temperatura en el inicio y final de la prueba del simulador de radiación solar (SC2)	105
Tabla 16	Comparativa temperatura en el inicio y final de la prueba del simulador de radiación solar (SC3)	105
Tabla 17	Comparativa temperatura en el inicio y final de la prueba del simulador de radiación solar (SC4)	106
Tabla 18	Zona de confort de acuerdo a temperatura media anual Dia típico del periodo cálido	107
Tabla 19	Horarios en los que se presentaron las temperaturas más elevadas	107
Tabla 20	Horarios en los que se presentaron las temperaturas más elevadas	109
Figura 1	Diferencias sistemas azoteas verdes (KVDP, 2014)	15
Figura 2	sistema azotea verde (IMPERQUIMIA S.A. De C.V, 2012)	16
Figura 3	Stuttgart (green roof safari, s.f.)	19
Figura 4	Azotea INFONAVIT, N. Gaia (el economista, 2015)	20
Figura 5	Brooklyn Grange, NY (Brooklyn Grange Rooftop Farm, 2005)	22
Figura 6	Huerto Romita, DF (Centro de Agricultura Urbana Romita, s.f.)	23

Figura 7. Esquema general del intercambio de calor en un techo verde (La Roche P, 2014)	25
Figura 8 Instalaciones de prueba de techos verdes. Sección de prueba en funcionamiento (a la izquierda); y esquemático con la mejora propuesta para permitir el control de la humedad con inyección directa de vapor.....	30
Figura 9 Mapa "División geo estadística delegacional y municipal" INEGI	32
Figura 10 Mapa de climas de la ZMVM INEGI.....	34
Figura 11 Caracterización física del suelo (civil geeks, s.f.)	47
Figura 12 Tabla comparativa de capacidad de campo y punto de marchitez de la empresa Traxco	47
Figura 13 Capacidad de Campo para diferentes tipos de suelos (FAO, 1998)	48
Figura 14 Punto de marchitez para diferentes tipos de suelos (FAO, 1998).....	48
Figura 15 Muestra de sustrato mezcla 1 después de 3hrs	50
Figura 16 Muestra de sustrato mezcla 1 después de 24hrs	50
Figura 17 Resultado de acuerdo a pruebas de la FAO	51
Figura 18 Distribución de perforaciones en charolas de cultivo	54
Figura 19 Altura del sustrato en charolas para pruebas	55
Figura 20 Distribución de vegetación de acuerdo a método biointensivo	55
Figura 21 Esquema del simulador de radiación solar de la UAM Azc	62
Figura 22 Imágenes tomadas con colores falsos que muestran uniformidad en el área de interés	63
Figura 23 Simulador de radiación solar ya adaptado para aporta los niveles de radiación PAR bajo los cuales funciona una muestra de techo verde.	67
Figura 24 Arreglo dedo de niño.....	78
Figura 25 Arreglo de yerbabuena y manzanilla	78
Figura 26 Arreglo de lechuga, acelga y cebolla cambra	79
Figura 27 Escaneo de hojas yerbabuena	85
Figura 28 Escaneo de hojas de lechuga.....	85
Figura 29 Detalle de trazo de hojas de yerbabuena	86
Figura 30 Calibración espectrofotómetro	87
Figura 31 Prueba realizada dentro del heliodom	88
Figura 32 Pestaña de edición de cubierta vegetal en Design Builder	92
Gráfica 1 Temperaturas de un techo verde en Alemania durante el verano.....	26
Gráfica 2 Temperaturas de un techo verde en Alemania durante el otoño	27
Gráfica 3 Temperaturas a una profundidad de 5 cm. en invierno.....	28
Gráfica 4 Temperaturas de un techo verde de 16cm. durante el invierno.....	28
Gráfica 5 Temperatura del aire	35
Gráfica 6 Temperatura diaria	35

Gráfica 7 Precipitación	36
Gráfica 8 Radiación global	37
Gráfica 9 Rosa de los vientos, estación meteorológica Merced, año 2017 (Secretaria Del Medio Ambiente, SEDEMA, CDMX, 2017)	37
Gráfica 10 Rosa de los vientos, estación meteorológica Pedregal, año 2017 (Secretaria Del Medio Ambiente, SEDEMA, CDMX, 2017)	38
Gráfica 11 Rosa de los vientos, estación meteorológica Tlalnepantla, año 2017 (Secretaria Del Medio Ambiente, SEDEMA, CDMX, 2017)	38
Gráfica 12 Comportamiento térmico placa caliente durante la prueba en conductímetro	59
Gráfica 13 Comportamiento térmico placa fría durante la prueba en conductímetro	60
Gráfica 14 Graficas arrojadas por espectrofotómetro STS (a). Espectro de Radiación solar (b) Espectro de lámpara halógena de 500W (c) Espectro de lámparas fluorescentes	65
Gráfica 15 Comportamiento térmico del sustrato (TIERRA NEGRA) durante la prueba realizada en el simulador de radiación	68
Gráfica 16 Comportamiento térmico del arreglo 1 (DEDO DE NIÑO) durante la prueba realizada en el simulador de radiación	69
Gráfica 17 Comportamiento térmico del arreglo 2 (HORTALIZAS) durante la prueba realizada en el simulador de radiación solar	70
Gráfica 18 Comportamiento térmico del arreglo 3 (HIERBAS) durante la prueba realizada en el simulador de radiación	70
Gráfica 19 Prueba dedo de niño pesos registrados durante un periodo de 24 horas exponiendo las muestras únicamente a radiación solar y bloqueando el sustrato para que no existieran ganancias o pérdidas a través del mismo	82
Gráfica 20 Prueba yerbabuena y manzanilla pesos registrados durante un periodo de 24 horas exponiendo las muestras únicamente a radiación solar y bloqueando el sustrato para que no existieran ganancias o pérdidas a través del mismo	82
Gráfica 21 Prueba lechuga, acelga y cebolla cambray pesos registrados durante un periodo de 24 horas exponiendo las muestras únicamente a radiación solar y bloqueando el sustrato para que no existieran ganancias o pérdidas a través del mismo	83
Gráfica 22 Caso 1 comparación entre la temperatura superficial del interior y exterior de la cubierta en el día típico periodo cálido, 20 de mayo.....	94
Gráfica 23 Comparación entre la temperatura superficial del interior y exterior de la cubierta en el día típico periodo frio, 9 de noviembre	98
Gráfica 24 Consumo mensual en kW	102
Gráfica 25 Consumo anual en kW de cada sistema de cubierta	103
Gráfica 26 Consumo anual en kW de cada sistema, calefacción y enfriamiento	103

Gráfica 27 Comparativo prueba realizada en el simulador de radiación solar	106
Gráfica 28 Porcentaje del día en confort.....	108
Gráfica 29 Meses de mayor y menor consumo en kW	110
Gráfica 30 Consumo anual en kW de cada sistema de cubierta	110
Gráfica 31 Consumo anual en kW de cada sistema, calefacción y enfriamiento	111