

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**DIVISIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

Desarrollo y caracterización de un nuevo sustrato de techos verdes para generar el confort térmico al interior de edificios públicos.

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en Ciencias (Construcción)

Presenta

Ing. Ramos Silva Guadalupe

Santiago de Querétaro, Querétaro, Mayo de 2016.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIVISIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

Desarrollo y caracterización de un nuevo sustrato de techos verdes para generar el confort térmico al interior de edificios públicos.

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias (Construcción)

Presenta:

Ing. Guadalupe Ramos Silva

Dirigido por:

Dr. José Gabriel Ríos Moreno

SINODALES

Dr. José Gabriel Ríos Moreno

Presidente

Dr. Mario Trejo Perea

Secretario

Dr. José Luis Reyes Araiza

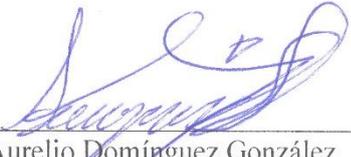
Vocal

Dr. Eusebio Ventura Ramos

Suplente

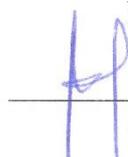
Dr. Guadalupe Moisés Arroyo Contreras

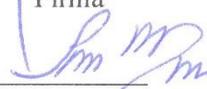
Suplente

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Aurelio Domínguez González  
Director de la Facultad de Ingeniería

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña  
Directora de Investigación y Posgrado

  
\_\_\_\_\_  
Firma

  
\_\_\_\_\_  
Firma

  
\_\_\_\_\_  
Firma

  
\_\_\_\_\_  
Firma

  
\_\_\_\_\_  
Firma

## RESUMEN

Realizar cualquier actividad al interior de los edificios en condiciones climáticas inapropiadas, originan una baja en el rendimiento del trabajo, pérdida de concentración y un aumento del número de errores. La mayoría de los edificios educativos en Querétaro, no tienen eficiencia al aislamiento térmico, ni protección de vegetación, tales techos mal aislados absorben y transmiten una cantidad considerable de calor para los espacios interiores subyacentes. Existen edificios que cuentan con sistemas de Calentamiento, Ventilación y Aire Acondicionado (HVAC) para generar el confort interior; sin embargo, esto representa elevados consumos de energía eléctrica, contaminación y costos monetarios; por lo tanto se requiere generar la sustentabilidad en los sistemas de generación de confort térmico interior. El objetivo de este trabajo es desarrollar y caracterizar un sustrato de techos verdes para generar el confort térmico al interior de edificios públicos por medio de las proporciones de la mezcla de los materiales y las variaciones de los espesores del tratamiento. El área de estudio se llevó a cabo en el edificio H de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro; para este estudio comparativo se toma como referencia únicamente las cuatro aulas de clase, por ser idénticas estructuralmente las cuales tienen una superficie de 48 m<sup>2</sup> respectivamente. Se considera un techo tradicional, un techo verde extensivo de 10 cm y dos techos verdes intensivos de 15 y 25 cm de espesor, se instaló un sistema de riego por aspersión y en la parte superior se colocó la vegetación, para este estudio se eligió *Aptenia cordifolia*; el sustrato a utilizar es un compuesto de arcilla con materia orgánica y arena pómez en las proporciones de un 60 % y 40 % respectivamente, el cual fue desarrollado y caracterizado con pruebas de laboratorio como son humedad, granulometría, densidad y permeabilidad. Los resultados mostraron que por medio de la caracterización de techos verdes se lograron los rangos de confort marcados por la norma ASRHAE en términos de temperatura y humedad relativa al interior del edificio, siendo el techo verde intensivo con el espesor de 15 cm el recomendable, debido a que presenta un mejor comportamiento térmico interno.

**(Palabras clave:** Techos verdes, Confort térmico, Construcción sustentable, Edificios públicos.)

## SUMMARY

Any activity inside the buildings on inappropriate weather conditions, originate a decline in the performance of work, loss of concentration and an increase in the number of errors. Most of the educational buildings in Querétaro, do not have efficient thermal insulation, or protection of vegetation, such poorly insulated roofs absorb and transmit a considerable amount of heat for the underlying interior spaces. There are buildings that have heating, ventilation and air conditioning (HVAC) systems to generate the interior comfort; however, this represents high consumptions of electric energy, pollution, and monetary costs; it is therefore required to generate sustainability in generation of interior thermal comfort systems. The objective of this work is to develop and characterize a substrate of green roofs to generate thermal comfort inside public buildings through the proportions of the mixture of materials and variations in the thickness of the treatment. The study area was conducted in the H building of graduate school of the Faculty of engineering of the Universidad Autónoma de Querétaro; for this comparative study is taken as reference only four classrooms, by being structurally identical which have an area of 48 square meters respectively. Is considered a traditional roof, a green roof extensive 10 cm thick and two intensive green roofs of 15 and 25 cm thick, was placed a system of irrigation sprinkler and vegetation was placed on the upper part, Aptenia was chosen for this study cordifolia the substrate used is a composite of clay with organic matter and sand pumice in the proportions of 60% and 40% respectively, which was developed and characterized with simple laboratory tests. The results showed that through the characterization of green roofs was reached the comfort ranges set by the norm in terms of temperature and relative humidity at the interior of the building, being the intensive green roof with 15 cm the optimum thickness, since presents a better internal thermal behaviour.

**(Key words:** Thermal comfort, green roofs, sustainable construction, green roof materials.)

### **A DIOS**

Primeramente gracias santo padre, por permitirme escribir estas líneas, te agradezco, por ayudarme, cuidarme, bendecirme, en todo momento.

### **PARA MIS PADRES**

Gracias por su apoyo en todo momento, por creer y confiar en mí, por estar siempre a mi lado, este logro no solo es mío sino también de ustedes, los amo con toda mi alma.

### **PARA MI HERMANO**

Que quiero mucho, por ser una persona buena, ser noble, trabajador, responsable, honesto y estar siempre a mi lado en todos los momentos tanto buenos como malos, pero siempre juntos.

### **PARA MI FAMILIA Y AMIGOS**

Gracias por su apoyo incondicional a todos y cada uno de ustedes, que con su apoyo me he convertido en la persona que soy hoy.

## **AGRADECIMIENTOS**

Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y a la Universidad Autónoma de Querétaro, por el apoyo y los financiamientos brindados para la realización de este trabajo.

Agradezco a todas las personas que me apoyaron con este trabajo, que invirtieron tiempo y dedicación, y a los que contribuyeron con su granito de arena, con comentarios, sugerencias y buena vibra para que eso saliera adelante de corazón.....MUCHAS GRACIAS.

# ÍNDICE

RESUMEN

SUMMARY

DEDICATORIAS

AGRADECIMIENTOS

ÍNDICE

ÍNDICE FIGURAS

ÍNDICE TABLAS

<b>I.</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1	Hipótesis.....	2
1.2	Objetivo General.....	2
1.3	Objetivos Particulares.....	2
<b>II.</b>	<b>REVISIÓN DE LA LITERATURA.....</b>	<b>3</b>
2.1	¿Qué es un techo verde? .....	3
2.2	Componentes de los techos verdes.....	3
2.3	Historia de los techos verdes .....	4
2.4	Tipología de los techos verdes.....	9
2.4.1	Techos verdes intensivos.....	9
2.4.2	Techos verdes semi-intensivos.....	9
2.4.3	Techos verdes extensivos.....	9
2.5	Beneficios de los techos verdes.....	10
2.6	Marco conceptual.....	14
2.6.1	La cubierta .....	14
2.6.2	Temperatura.....	14
2.6.3	Humedad relativa.....	15
2.6.4	Confort Térmico.....	15
<b>III.</b>	<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>18</b>
3.1	Experimento.....	18
3.1.1	Área de estudio .....	18
3.1.2	Análisis estructural.....	20
3.1.3	Instrumentos de monitoreo .....	25
3.2	Métodos y materiales.....	26
3.2.1	Caracterización del sustrato.....	26
3.2.2	Selección y características de la vegetación.....	28
3.2.3	Instalación de los sustratos intensivos y extensivos.....	29
<b>IV.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIONES.....</b>	<b>32</b>
4.1	Monitoreo de los techos verdes.....	32
4.1.1	Primer monitoreo de las variables internas primer trimestre.....	32
4.1.2	Segundo monitoreo de las variables internas segundo trimestre.....	36
4.1.3	Monitoreo mensuales de las variables internas .....	38
4.1.3.1	Mes de Mayo – Junio .....	38

4.1.3.2 Mes de Junio –Julio.....	40
4.1.3.3 Mes de Julio – Agosto .....	42
4.1.3.4 Mes de Agosto – Septiembre .....	45
4.1.3.5 Mes de Septiembre – Octubre.....	48
4.2 Resumen anual.....	51
4.3 Comparativa.....	54
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>62</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>65</b>
<b>ANEXOS</b>	

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
2.1	Componentes de los techos verdes	4
2.2	Museo L'Historial de la Vendée	5
2.3	Banco Santander Madrid, España	6
2.4	Mayor Daley's City Hall.	7
2.5	Azotea Verde de la Glorieta de Insurgentes	8
2.6	Azotea verde en las instalaciones del INFONAVIT	8
3.1	Mapa del clima del estado de Querétaro.	18
3.2	Aulas del edificio de estudio, vista planta.	19
3.3	Aulas del edificio de estudio, vista sur.	19
3.4	Vista en planta del edificio.	20
3.5	Modelo estructural idealizado en SAP 2000.	20
3.6	Vista en planta de la estructura.	21
3.7	Secciones de los elementos estructurales (concreto $f'c = 300$ kg/cm <sup>2</sup> ).	21
3.8	Estructura antes de la aplicación de carga.	23
3.9	Estructura después de la aplicación de carga (Combinación de Estado Límite de Servicio).	23
3.10	Estructura después de la aplicación de carga (Combinación de Estado Límite Ultimo).	23
3.11	Vista en corte del área de aplicación de los techos verdes.	25
3.12	Esquema de instrumentación de monitoreo.	26
3.13	Materiales puestos en el lugar de estudio.	27
3.14	Foto de la planta Aptenia cordifolia.	29
3.15	Esquema de techos verdes y techo tradicional.	30
3.16	Foto limpieza general del techo.	30
3.17	Foto colocación de impermeabilizante.	31
3.18	Foto colocación de geomembrana.	31
3.19	Foto de colocación de sistema de riego, sustrato y vegetación.	32
4.1	Gráficas de las variables internas del salón 20 (primer monitoreo).	34
4.2	Gráficas de las variables internas del salón 21 (primer monitoreo).	35
4.3	Gráficas de las variables internas del salón 22 (primer monitoreo).	35
4.4	Gráficas de las variables internas del salón 21 (segundo monitoreo).	37
4.5	Gráficas de las variables internas del salón 22 (segundo monitoreo).	37
4.6	Gráficas de las variables internas del salón 20 (mayo-junio).	39
4.7	Gráficas de las variables internas del salón 21 (mayo-junio).	39
4.8	Gráficas de las variables internas del salón 22 (mayo-junio).	40
4.9	Gráficas de las variables internas del salón 20 (junio-julio).	41
4.10	Gráficas de las variables internas del salón 21 (junio-julio).	42
4.11	Gráficas de las variables internas del salón 22 (junio-julio).	42
4.12	Gráficas de las variables internas del salón 20 (julio-agosto).	44
4.13	Gráficas de las variables internas del salón 21 (julio-agosto).	44
4.14	Gráficas de las variables internas del salón 22 (julio-agosto).	45
4.15	Gráficas de las variables internas del salón 20 (agosto-septiembre).	46
4.16	Gráficas de las variables internas del salón 21 (agosto-septiembre).	47
4.17	Gráficas de las variables internas del salón 22 (agosto-septiembre).	47
4.18	Gráficas de las variables internas del salón 20 (septiembre-octubre).	49
4.19	Gráficas de las variables internas del salón 21 (septiembre-octubre).	49
4.20	Gráficas de las variables internas del salón 22 (septiembre-octubre).	50
4.21	Variaciones de temperatura promedio.	53

---

4.22	Variaciones de temperatura máximas promedio.	53
4.23	Variaciones de temperatura mínimas promedio.	54
4.24	Comparativa techo tradicional vs techo extensivo.	56
4.25	Comparativa techo tradicional vs techo intensivo 15 cm.	56
4.26	Comparativa techo tradicional vs techo intensivo 25 cm.	57
4.27	Comparativa techo tradicional vs techo extensivo.	57
4.28	Comparativa techo tradicional vs techo intensivo 15 cm.	58
4.29	Comparativa techo tradicional vs techo intensivo 25 cm.	58
4.30	Comparativa techo tradicional vs techo extensivo.	60
4.31	Comparativa techo tradicional vs techo intensivo 15 cm.	60
4.32	Comparativa techo tradicional vs techo intensivo 25 cm.	61
4.33	Comparativa techo tradicional vs techo extensivo.	61
4.34	Comparativa techo tradicional vs techo intensivo 15 cm.	62
4.35	Comparativa techo tradicional vs techo intensivo 25 cm.	62

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>		<b>Página</b>
2.1	Clasificación de techos verdes y sus principales características	10
2.2	Relación entre las diferentes actividades y sus niveles metabólicos.	16
2.3	Equivalencia entre el vestido y clo.	17
2.4	Sensación térmica en función de la humedad relativa del aire.	17
3.1	Deflexiones máximas en los techos verdes.	24
3.2	Características de los materiales y los sustratos para los techos verdes.	28
4.1	Registros de la variable de temperatura interna, en el primer monitoreo comprendido entre los meses de enero y marzo 2015.	33
4.2	Registros de la variable de humedad relativa interna, en el primer monitoreo comprendido entre los meses de enero y marzo 2015.	33
4.3	Registros de la variable de temperatura interna, en el segundo monitoreo comprendido entre los meses de marzo y mayo de 2015.	36
4.4	Registros de la variable de humedad relativa interna, en el segundo monitoreo comprendido entre los meses de marzo y mayo de 2015.	36
4.5	Registros de la temperatura en el interior de las aulas, en el periodo de mayo y junio.	38
4.6	Registros de la humedad relativa en el interior de las aulas, en el periodo de mayo y junio.	38
4.7	Registros de la temperatura en el interior de las aulas, en el periodo de junio y julio	40
4.8	Registros de la humedad relativa en el interior de las aulas, en el periodo de junio y julio.	41
4.9	Registros de la temperatura en el interior de las aulas, en el periodo julio – agosto.	43
4.10	Registros de la humedad relativa en el interior de las aulas, en el periodo julio – agosto.	43
4.11	Registros de la temperatura en el interior de las aulas, en el periodo agosto – septiembre.	45
4.12	Registros de la humedad relativa en el interior de las aulas, en el agosto – septiembre.	46
4.13	Registros de la temperatura en el interior de las aulas, en el periodo septiembre – octubre.	48
4.14	Registros de la humedad relativa en el interior de las aulas, en el septiembre – octubre.	48
4.15	Variaciones de los parámetros internos, en el salón 20.	50
4.16	Variaciones de los parámetros internos, en el salón 21.	51
4.17	Variaciones de los parámetros internos, en el salón 22.	51
4.18	Temperatura promedio anual.	51
4.19	Temperaturas máximas promedios anual.	52
4.20	Temperaturas mínimas promedios anual.	52
4.21	Temperaturas máximas anuales.	54
4.22	Temperaturas mínimas anuales.	55
4.23	Humedades máximas anuales.	58
4.24	Humedades mínimas anual	59

## I. INTRODUCCIÓN

La edificación verde es la práctica de crear modelos más amigables con el medio ambiente mediante el uso eficiente de recursos utilizados en la construcción, la introducción de plantas y paisajes a las superficies de edificios se puede considerar como una técnica que reduce la temperatura del edificio hasta 20°C, además reducen entre 25 y 80% del consumo de la energía eléctrica en sistemas de aire acondicionado (Cidell y Beata, 2009).

Los techos verdes, también llamados “eco techos”, “techos vivientes” o “techos jardines”, son básicamente techos con plantas en su capa final (Dunnett, 2008), éstos techos se construyen generalmente para mejorar la eficiencia energética en los edificios, pero cabe mencionar que existen muchos otros beneficios, de hecho su capa vegetal se da cuenta de los procesos de fotosíntesis, mientras que su capa del suelo permite la absorción de las precipitaciones; a menudo, resultando en una mejora en la calidad del agua de escorrentía (Bates et al., 2013). Los techos verdes son generalmente clasificados como extensivo o intensivos, aunque algunos autores incluyen un semi intensivos (Yang y Yu 2008, Liu et al., 2005).

La función principal de los techos verdes es evitar la radiación solar que se transmite al interior en forma de calor en la construcción. Los techos verdes son capaces de reflejar y absorber alrededor del 27 y 60% de la radiación solar respectivamente a través de la fotosíntesis y transmitir el resto (13%) al medio de cultivo (Weng et al., 2004).

Los techos verdes esencialmente impide la penetración del calor solar para los componentes de construcción cubiertos (Castetlon 2010, Morau et al., 2012, Jaffal 2013, Chen 2013). Liu et al., 2003 denotan que los techos verdes mejoran el rendimiento térmico de un edificio a través del sombreado, el aislamiento, y la masa térmica. Saiz et al., 2006, afirma que la absorción solar es la propiedad clave de un techo verde. Dependiendo del espesor de techo verde, se logran generar menores ganancias o pérdidas de calor, y a menudo tiene un mejor rendimiento térmico.

Uno de los principales problemas de los edificios públicos, es dar confort a sus ocupantes y así poder aumentar el rendimiento del usuario, con el menor consumo de energía y de manera sustentable, por lo tanto se requiere generar la sustentabilidad en los sistemas de generación de confort térmico interior.

Las construcciones de uso educativo deben proporcionar a sus ocupantes este ambiente confortable y saludable para trabajar. Si los factores ambientales de las aulas están dentro de los límites de confort, el rendimiento de los estudiantes mejorará y el trabajo de los docentes será de mayor calidad.

La mayoría de los edificios de uso educativo en el estado de Querétaro, no tienen eficiencia al aislamiento térmico, sin la protección de la vegetación, tales techos mal aislados absorben y transmiten una cantidad considerable de calor para los espacios interiores subyacentes.

Por lo tanto el desarrollo de un estudio comparativo en edificios públicos tradicional y un edificio equipado con tecnologías de techos verdes, al ser caracterizados de manera apropiada los sustratos e incorporando un comparativo de techos verdes intensivos y extensivos permitiría evaluar los rangos de operación de temperatura y humedad y con ellos poder generar el confort térmico interior.

### **1.1 Hipótesis**

A través de las variaciones de los sustratos de los techos verdes en climas semisecos, se logra disminuir la temperatura interna hasta 5 °C y la humedad relativa hasta un 25 %, en edificios públicos.

### **1.2 Objetivo General**

El objetivo de éste estudio es mostrar un estudio comparativo de aulas de clases tradicional y aulas equipadas con tecnologías de techos verdes, caracterizados por sustratos intensivos y extensivos, para evaluar los rangos de operación de temperatura y humedad que generan el confort térmico interior..

### **1.3 Objetivos Particulares**

- Por medio del programa SAP 2000, se realiza las simulaciones y el análisis del comportamiento estructural del edificio, para determinar el peso adicional que le genere los techos verdes.
- Implementar el uso de techos verdes intensivos y extensivos en edificio públicos, variando los espesores en los sustratos, para posteriormente seleccionar la vegetación adecuada.

- Realizar un estudio comparativo de los techos verdes en contra los techos convencionales en edificios públicos para poder generar confort térmico interno.

## **II. REVISIÓN DE LA LITERATURA**

### **2.1 ¿Que es un techo verde?**

Los techos verdes, conocidos también como techos ecológicos, cubiertas verdes, sistemas de naturación y azoteas verdes, son una nueva forma de incorporación de masa vegetal a la vida urbana, en aquellos espacios que han sido poco valorados como los envolventes de las edificaciones (García, 2010).

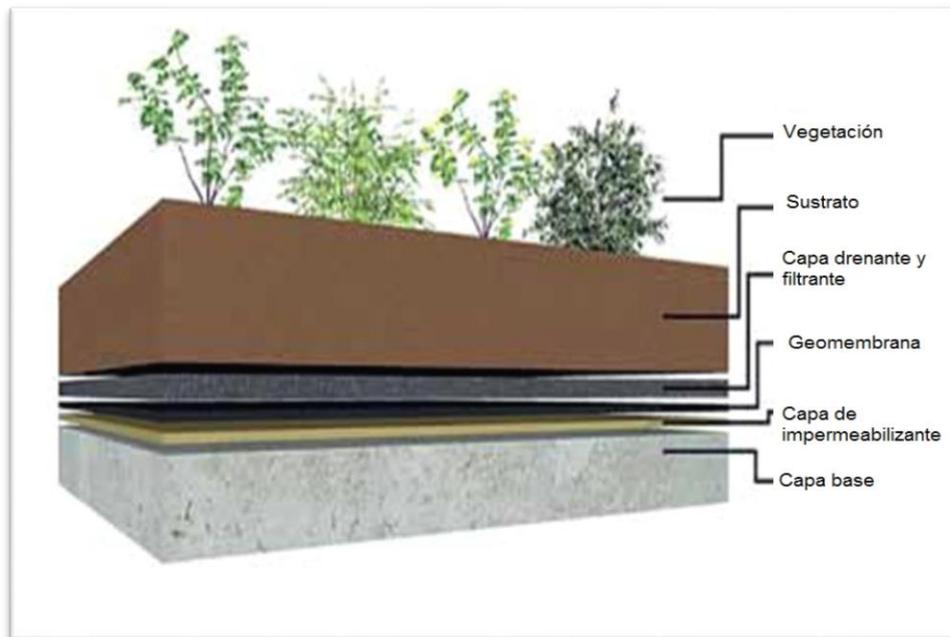
Parizotto y Lamberts, (2011) definen que los techos verdes se llaman también techos vivientes, eco – techos o techos jardines y son básicamente techos con plantas en su capa final.

Podemos decir que los techos verdes son unos tipos de techos diseñados para recrear las condiciones naturales de los substratos del suelo, y esto nos permite sostener distintos tipos de vegetación, desde arbustos, césped y plantas pequeñas, hasta arboles de tamaño mediano.

### **2.2 Componentes de los techos verdes**

Los techos verdes son un sistema integral conformado por varias capas de diferentes materiales, dispuestos para proteger el inmueble contra daños por la exposición al medio ambiente y a su vez promover el crecimiento de vegetación.

De acuerdo García (2010), los techos verdes están compuestos por las siguientes capas (figura 2.1) de abajo hacia arriba:



**Figura 2.1. Componentes de los techos verdes (García, 2010).**

- Capa base: donde se apoyan todos los componentes (teja, cemento, vigas, etc.).
- Capa de impermeabilizante: tiene como objetivo detener el agua, impidiendo su paso.
- Geomembrana: controla y soporta el crecimiento radical de las especies vegetales.
- Capa drenante y filtrante: sirve para recibir las precipitaciones y conducir las hacia los desagües de la cubierta, evita el paso de las partículas finas del sustrato hacia la capa drenante.
- Capa de sustrato: sirve de soporte físico a la capa de vegetación, suministrándole los nutrientes necesarios para su crecimiento.
- Capa de vegetación: material vegetal (plantas) usado para la cobertura.

### **2.3 Historia de los techos verdes**

El uso de los techos verdes se remonta a varios siglos atrás. El primer antecedente del que se tiene registro son los “Jardines Colgantes de Babilonia”, creados en los siglos VII y VIII a.C. Posteriormente el arquitecto suizo Charles Édouard Jeanneret-Gris, fue el primero en incluir el concepto de azotea verde en Europa Occidental.

En Alemania, en la década de los sesenta se empezó a desarrollar la técnica de los “techos verdes”, la cual se difundió posteriormente a lo largo de toda Europa. En la actualidad se calcula que alrededor del 40% de las ciudades alemanas ofrecen algún tipo de incentivo para la instalación de azoteas verdes en sus edificaciones.

Además de Alemania, la mayoría de los países europeos cuentan con techos verdes en sus edificios algunos de ellos son: Suiza, Holanda, Hungría, Suecia e Inglaterra, los cuales tiene asociaciones para fomentar la instalación de techos verdes. Francia cuenta con una enorme azotea verdes de 8,000 metros cuadrados aproximadamente, la cual fue instalada en el museo L'Historial de la Vendée, (figura 2.2)



**Figura 2.2. Museo L'Historial de la Vendée.**

La ciudad de Madrid, España, cuenta con una de los techos verdes más grandes del continente europeo, la cual está instalada en el Banco Santander con más de 100,000 metros cuadrados (figura 2.3).



**Figura 2.3. Banco Santander Madrid, España**

En el continente asiático un país representante en este tema es Japón, en la ciudad de Tokio se incluyó como requisito de todo aquel nuevo edificio con área mayor a 1000 metros cuadrados sobre el suelo, tendrá que contar un techo verde del 20% total de la edificación, con esta medida se desea lograr instalar 1200 hectáreas de azoteas verdes y poder reducir la temperatura del centro de la ciudad un grado Celsius.

En lo que respecta al continente americano destacan los Estados Unidos de América, específicamente la Ciudad Illinois, tratando de ser la ciudad más verde de dicho país, colocó en gran escala azoteas verdes sobre las edificaciones nuevas y existentes. Estudios realizados en Estados Unidos de América han determinados que las edificaciones que cuentan con una azotea verde han disminuido el consumo de energía hasta en un 25%.

La ciudad de Chicago, por su parte, tiene una gran cantidad de azoteas verdes instalada en sus edificaciones (más de 200), mismas que cubren un área de 232,250 metros cuadrados aproximadamente. Uno de los edificios que cuentan con azotea verde es el Mayor Daley's City Hall (figura 2.4).



**Figure 2.4. Mayor Daley's City Hall.**

En lo que concierne a México es muy poca la construcción de las azoteas verdes. El inicio de la instalación este tipo de infraestructura fue en el año 1999 en el Instituto de Biología de Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), por lo medio de un convenio con la Comisión de Recursos Naturales de Gobierno de la Ciudad de México (CORENA).

En México se consideraba a mediados del año 2000, una cifra de 3000 metros cuadrados de azoteas verdes aproximadamente, pero después del se segunda mitad del año 2000 se ha dado mayor difusión a este tema, esta ha dado pie al incremento de investigación sobre su instalación, dicha investigación es llevada a cabo por la UNAM a través del Jardín Botánico y por diversos institutos.

El gran interés de diversas Instituciones llevo a la Asociación Mexicana para la Naturación de Azoteas Verdes a crear la primer norma para la instalación de “sistemas naturados” (sinónimo de azotea verde), siendo ésta la primera de Latinoamérica, esto conlleva a la fundación de nuevas organizaciones y grupos para impulsar la instalación de azoteas verdes.

México es conocido como uno de los países que encabezan el movimiento de instalación de azoteas verdes en Latinoamérica, en el año 2011 México contaba con casi 20,000 metros cuadrados de azoteas verdes en edificios públicos, teniendo el objetivo de llevar a cabo la instalación de 10,000 metros cuadrados de azoteas verdes por año en estos edificios, tratando de llegar a los 30,000 metros cuadros durante el año 2012.

Los edificios públicos con áreas naturadas hasta el año 2011 eran: el Banco HSBC, el Museo Interactivo de Economía, la Glorieta de Insurgentes con alrededor de 1037 metros cuadrados, y la azotea verde más grande de México que se encuentra en las instalaciones del infonavit contando con 5200 metros cuadrados, en lo que respecta al Distrito Federal y área conurbada (figuras 2.5 y 2.6).



**Figura 2.5. Azotea Verde de la Glorieta de Insurgentes**



**Figura 2.6. Azotea verde en las instalaciones del INFONAVIT**

## **2.4 Tipología de los techos verdes**

Los techos verdes están clasificados en: extensivos, semi-intensivos, o intensivos, según la profundidad del medio de cultivo y sus plantas, así como según el grado de mantenimiento requeridos, los principales atributos se muestran en la tabla 2.1.

### **2.4.1 Techos verdes intensivos**

Intensivos: Se consideran como jardines convencionales; son accesibles y tienen sustratos espesos que alojan una variedad de plantas, desde comestibles y arbustos, hasta árboles. Los techos intensivos requieren que la capa del sustrato sea mayor de 30 cms., lo que aumenta el peso del sistema, además, el costo de instalación y el mantenimiento son elevados ya que se requiere riego, fertilización y poda constante. Se procura que este tipo de sistema se realice en construcciones nuevas, ya que es necesario un cálculo estructural detallado debido a que el peso del sistema es superior a los 250 Kg/m<sup>2</sup>, hasta los 400 Kg/m<sup>2</sup> (López, 2010).

### **2.4.2 Techos verdes semi-intensivos**

Semi-intensivos: Estos sistemas se consideran intermedios debido a que el espesor del sustrato oscila entre los 12 y 30 cm., lo que disminuye la selección de especies vegetales en comparación con el sistema intensivo, aunque brindan ms posibilidades que el sistema extensivo, requieren mantenimiento regular, el peso aproximado del sistema es entre 120 y 250 Kg/m<sup>2</sup> (García, 2010).

### **2.4.3 Techos verdes extensivos**

Extensivos: Estos sistemas son de bajo mantenimiento y generalmente se instalan en lugares inaccesibles. A menudo se plantan en ellas especies con poco requerimiento de humedad con solo a 5 a 15 cm de sustrato y suelen subsistir con aguas de lluvia. La vegetación es de bajo porte, usando generalmente especies endémicas o adaptadas a las condiciones ambientales, por ello su mantenimiento es mínimo, el peso aproximado del sistema oscila entre 60 y 140 Kg/m<sup>2</sup> (Stovin et al., 2007). Así esta clase de cubierta verde es la más apta para ser utilizada en construcciones existentes, ya que se necesitan mínimos refuerzos en la estructura para soportar el peso adicional.

**Tabla 2.1. Clasificación de techos verdes y sus principales características con el apoyo de la literatura.**

<b>Atributos principales</b>	<b>Extensivo</b>	<b>Intensivo</b>	<b>Fuente</b>
Espesor de medios de cultivo	Por debajo de 150 mm	Por encima de 150 mm	Lanham, 2007; Liu, 2005.
Accesibilidad	Inaccesibles (raíces frágiles)	Accesibles (utilizable para fines de recreación)	Lanham 2007; Liu KY, 2005; Maclvor et al., 2013.
Peso	60 – 150 kg/m <sup>2</sup>	Mayor a 300 kg/m <sup>2</sup>	Lanham, 2007; Liu KY, 2005; Maclvor et al., 2013.
Diversidad de las Plantas	Baja (musgo, hierba y pasto)	Alto (césped o las plantas perennes, arbustos y árboles.	Bates et al., 2013; Lanham 2007; Liu, 2005; Maclvor et al., 2013.
Construcción	Moderadamente fácil	Técnicamente complejo	Baskaran 2005; Emilsson 2008.
Riego	A menudo no es necesario	La necesidad de los sistemas de drenaje y riego	Bates et al., 2013; Lanham 2007; Liu, 2005; Maclvor et al., 2013; Emilsson 2008.
Mantenimiento	Simple	Complicado	Cox BK , 2010; Kim et al., 2012; Sun et al., 2013.
Costo	Bajo	Alto	Peri et al., 2012; Castleton et al., 2010; Dinsdale et al., 2006.

## **2.5 Beneficios de los techos verdes**

Los techos verdes así como sus beneficios han sido investigados en todas partes del mundo. Los siguientes datos son los resultados de dichas investigaciones más recientes que han permitido mejorar la comprensión de los beneficios de techos verdes.

Mejoramiento de la calidad del aire: La contaminación del aire en el ambiente urbano es uno de los problemas de mayor importancia para la salud humana. Los estudios demuestran que la vegetación puede contribuir significativamente a la reducción de la contaminación del aire en las ciudades (Nowak, 2006). La vegetación retiene polvo y partículas contaminantes presentes en el aire por medio de la adhesión (Jun, Yu y Gong, 2008) y gracias al efecto de microclima. Jun Yang et al. (2008) demuestran que el nivel anual de retención de los contaminantes del aire en Chicago por hectárea del techo intensivo es de 85kg. En las ciudades más pequeñas este resultado oscila alrededor de 0.2 kg por m<sup>2</sup> por año (Kuhn y Peck, 2003). Además de filtrar las partículas del aire, las plantas captan CO<sub>2</sub> y liberan oxígeno (Li et al., 2010). La investigación de Li et al. (2010) concluyó que en Hong Kong, en un día soleado, un

techo verde extensivo puede reducir la concentración de CO<sub>2</sub> en su entorno hasta en un 2%. Otros estudios reportan un 37% de reducción de dióxido de azufre y una reducción del 21% del ácido nitroso (Yok Tan y Sia, 2005).

**Manejo de aguas lluvias:** Los techos verdes tienen la capacidad de retención de agua, almacenándola en el sustrato, donde es absorbida por las plantas y luego devuelta a la atmósfera mediante el proceso de evaporación y transpiración (Wong et al., 2003; Carter y Keeler, 2008). Los estudios de estos investigadores demuestran que las cubiertas verdes tienen la capacidad de absorber, filtrar, retener y almacenar entre 40 y 80 por ciento de la precipitación anual que cae sobre ellas, dependiendo de la intensidad de las precipitaciones y el tipo y grosor de la capa del sustrato. Una capa de 12 cm. demora hasta 12 horas en comenzar a liberar el agua almacenada durante un evento de lluvia y continúa liberándola durante cerca de 21 horas (Scholz- Barth y Tanner, 2004), lo que ayuda a reducir la tasa de flujo y el volumen del agua en el sistema de alcantarillado (López, 2010). Además de reducir el flujo de agua, los techos verdes retardan el momento crítico de la descarga al drenaje, ya que el sustrato necesita tiempo para saturarse (Carter y Jackson, 2007).

**Regulación de la temperatura y ahorro de electricidad:** La vegetación sobre las cubiertas tiene un alto efecto de aislamiento térmico, ya que la capa de sustrato funciona como un colchón que no permite que el techo se caliente (Gernot, 2004). En este contexto, las mediciones realizadas a una cubierta verde en Nottingham Trent University demuestran que mientras la temperatura exterior promedio es de 18.4°C y la temperatura bajo la membrana de un techo normal oscila alrededor de 32.0°C, bajo la membrana del techo verde es de 17.1°C (Livingroofs. org y Ecology Consultancy Ltd., 2004). En efecto, los techos verdes reducen el consumo de electricidad por el sistema de aire acondicionado (Wong et al., 2003) hasta en 50% (Akbari, 1995). Además de tener la función de aislador, las cubiertas verdes reducen la temperatura del ambiente por medio de procesos fisiológicos de la vegetación como son la evapotranspiración, la fotosíntesis y la capacidad de almacenar calor de su propia agua.

**Prolongación de la vida útil de la cubierta:** Los techos verdes ayudan a proteger las cubiertas de fluctuaciones extremas de temperatura, lo que aumenta la durabilidad estructural de la cubierta (Teemusk y Mander, 2009). Con las cubiertas verdes, se puede extender la vida de un techo a 40 años, que es el doble de una cubierta

tradicional (Ibáñez, 2008). En Europa, donde la tecnología de techos verdes inició hace más de 20 años, algunas investigaciones concluyen que las membranas cubiertas por vegetación pueden prolongar la vida del techo hasta 50 años o 60 años (Livingroofs.org y Ecology Consultancy Ltd., 2004).

Reducción del efecto de isla de calor: El efecto de isla de calor es el aumento de la temperatura en zonas urbanas, en relación con los alrededores. En ciudades grandes, esta diferencia puede alcanzar hasta los 5° C, siendo la Ciudad de México un ejemplo específico que alcanza los 9°C de diferencia (Akbari, 1995). Las zonas urbanas cuentan con extensas áreas de superficie dura que absorben radiación solar y reflejan este calor de nuevo hacia la atmósfera. La vegetación, debido a su comportamiento térmico y físico, absorbe el calor y lo utiliza a través del proceso de evapotranspiración, reduciendo la temperatura urbana y el efecto de smog (Akbari y Konopacki, 2005).

Creación de hábitats: Los techos verdes pueden convertirse en hábitat de fauna menor, contribuyendo a la conservación de la biodiversidad en áreas urbanas. Estudios detallados sobre la relación entre los techos verdes y la biodiversidad han sido realizados desde 1997. Como resultado, la utilidad de las cubiertas verdes para los voladores pequeños ha sido comprobada (Johnston y Newton, 2004). Las cubiertas verdes también proporcionan espacio para anidación de comunidades de aves nativas (Baumann, 2006). El UK Biodiversity Action Plan considera los techos verdes como un importante vínculo entre los hábitats fragmentados que proporciona nuevos espacios para especies raras y protegidas (Currie y Bass, 2010).

Beneficios físicos y psicológicos: Los techos verdes proveen beneficios psicológicos y físicos relacionados con relajación, regeneración, reducción de estrés y provisión del aire más limpio (Hartig et al. 1991). Samangooei (2006) identifica multitud de casos que demuestran la relación positiva entre las cubiertas verdes y los beneficios psicológicos y físicos para las personas.

Beneficios sociales: Los beneficios sociales incluyen la integración del edificio a entornos naturales, las variadas posibilidades de diseño y la utilización del espacio para descanso y esparcimiento (Ibáñez, 2008). La implantación de sistemas de naturación aumenta la superficie verde en las zonas urbanas y permite utilizar un espacio que actualmente está desaprovechado. Especialmente los techos verdes intensivos presentan un potencial muy alto para áreas altamente urbanizadas. Para un

hotel ubicado en el centro de la ciudad, un jardín en el techo es una ventaja competitiva, ya que la vegetación proporciona un espacio verde altamente valorado por los turistas. Además el techo puede ser utilizado como mirador y cafetería.

**Reconocimiento y responsabilidad ambiental:** Los techos verdes son fácilmente reconocibles, ya que los edificios que implementan esta tecnología difieren significativamente de los demás edificios en las áreas urbanas. Por lo tanto, las edificaciones de este tipo reciben un cierto reconocimiento, especialmente en aquellas ciudades donde apenas se están implementando por primera vez. Es común que los primeros edificios que instalan una cubierta verde sean comerciales, como hoteles y empresas reconocidas, o públicos como universidades e instituciones municipales. Estos edificios son casos exitosos de responsabilidad socio-ambiental, por lo que reciben publicidad en medios de comunicación local, nacional, hasta internacional. Además del reconocimiento, las empresas privadas e instituciones públicas aprovechan la imagen de responsabilidad socio-ambiental en sus campañas de marketing.

**Incremento del valor comercial:** La popularidad de los espacios verdes también se refleja en los valores inmobiliarios. Hoy, existen muchas experiencias documentadas, especialmente en Europa, donde las cubiertas verdes proporcionan un valor agregado, aumentando el precio comercial de los edificios, en la mayoría de uso residencial (especialmente torres de apartamentos), oficinas, hoteles, edificios para la recreación y el esparcimiento (Ibáñez, 2008). Fuera de Europa también se ha registrado una dinámica similar. En Tokio, se han comenzado a instalar cubiertas verdes para incrementar el valor del m<sup>2</sup> en los edificios. Finalmente, en los Estados Unidos, se ha registrado un aumento en el valor de los edificios con techos verdes entre 6 y un 15% (Johnston y Newton, 2004).

**Productividad y generación de ingreso:** Los techos verdes generan la posibilidad de practicarla agricultura urbana que es una manera creativa y práctica para aprovechar áreas sub utilizadas de las ciudades. Según los resultados del proyecto piloto de Kortright (2001), las condiciones para cultivar en techos no difieren sustancialmente de las condiciones en tierra. Las experiencias más recientes de Canadá, Estados Unidos, Reino Unido, Japón, Singapur, Tailandia y Taiwán (Hui, 2011) confirman que la producción de alimentos de autoconsumo e incluso venta es completamente viable.

## **2. 6 Marco conceptual**

Fenómeno: Disminución de la temperatura de una envolvente arquitectónica por medio de nuevas tecnologías como son los techos verdes.

Para que este fenómeno suceda, es necesario que se conjuguen a un mismo tiempo algunas variables como lo son la ventilación, radicación solar, la temperatura exterior, la humedad relativa y la evapotranspiración. Estas variables no son controladas, puesto que están dadas por el medio ambiente circundante; pero la evapotranspiración puede manipularse en ciertos momentos puesto que es afectada directamente por el riego.

La radiación solar, afecta directamente tanto a la temperatura ambiente como al fenómeno a investigar, la ventilación también afecta directamente a la disminución de la temperatura. El riego al incidir sobre la cubierta vegetal favorece la evapotranspiración que a su vez ayuda a la disminución de la temperatura interior del edificio. Al mismo tiempo incrementa la humedad relativa del microclima creado en la cubierta, y esta humedad relativa incide también en el fenómeno a estudiar.

### **2. 6. 1 La cubierta**

Del total de elementos que conforman el edificio, la cubierta tiene especial importancia para el comportamiento climático interior.

Dependiendo del espesor de techo verde, se logran generar menores ganancias o pérdidas de calor, y a menudo tiene un mejor rendimiento térmico; el aumento de 10 cm de espesor del sustrato incrementa la resistencia térmica del techo del edificio (Wong et al., 2003); sin embargo, la presencia y la cantidad de agua en gran medida influye sobre las propiedades térmicas de la azotea verde, de hecho un techo húmedo ofrece evapotranspiración adicional que impide el flujo de calor en el edificio y actúa como un refrigerador pasivo por la eliminación de calor interior del edificio (Emmilson 2008, Nagase y Dunnett 2010); Theodosiou 2009 y Lundholm et al., 2010, coinciden que el tipo de vegetación es crucial para el rendimiento térmico.

### **2. 6. 2 Temperatura**

La temperatura es un parámetro termodinámico del estado de un sistema que caracteriza el calor, o transferencia de energía.

La temperatura de un cuerpo no es una propiedad que pueda medirse directamente, sino que para obtenerla se emplean otras propiedades, ya sean del propio cuerpo a medir,

o del aparato que se utiliza para tal fin, llamado termómetro. Este método de medir la temperatura es posible pues se conoce la relación entre la temperatura de un cuerpo y alguna otra propiedad, que puede ser, por ejemplo la dilatación. Dependiendo de la variable termométrica utilizada los termómetros reciben distintos nombres y funcionan de manera diferente.

### **2. 6. 3 Humedad Relativa**

Es la humedad que contiene una masa de aire, en relación con la máxima humedad absoluta que podría admitir sin producirse condensación, conservando las mismas condiciones de temperatura y presión atmosférica. Esta es la forma más habitual de expresar la humedad ambiental y se expresa en porcentaje.

### **2. 6. 4 Confort térmico**

La confortabilidad puede ser definida como el conjunto de condiciones en las que los mecanismos de autorregulación son mínimos o como la zona delimitada por unos umbrales térmicos en la que el mayor número de personas manifiesten sentirse bien.

Según la American Society of Heating Refrigeration and Air conditioning Engineers, más conocida como ASHRAE, el confort es definido como aquellas condiciones de la mente, que expresan satisfacción del ambiente térmico.

**La norma ASHRAE, nos marca una temperatura de confort la cual varía de 22.5°C a 26.5°C y una humedad relativa de 30% al 80%.**

Para Givoni es la ausencia de irritación o malestar térmico. Este autor define unas zonas de bienestar térmico, cuya delimitación tienen un fundamento fisiológico y están determinadas por un conjunto de condiciones para las que los mecanismos termorreguladores se encuentran en un estado de mínima actividad.

El concepto de confort, por tanto, admite varias definiciones, pero en todas se halla presente el concepto de equilibrio energético entre el cuerpo humano y su entorno.

El intercambio de calor con el exterior está controlado por tres factores: **el metabolismo**, que supone ganancias por la ingestión de alimentos y su combustión; **el intercambio térmico** entre el cuerpo y el ambiente que le rodea, por conducción,

convección y radiación y las pérdidas por **evaporación** del agua de los pulmones o de la piel (sudoración).

La energía producida por el metabolismo está directamente relacionada con la actividad desarrollada, ya que el proceso metabólico produce un exceso de energía al realizar un determinado trabajo, en proporciones mayores a las requeridas al disminuir la eficiencia del cuerpo.

El exceso se transforma en calor, denominado calor metabólico. En reposo absoluto el gasto de energía es el mínimo necesario para mantener las funciones vegetativas y se denomina metabolismo basal. Pero incluso en esta situación el calor generado es del orden de 70 w/h (Tabla 2.2).

**Tabla 2.2. Relación entre las diferentes actividades y sus niveles metabólicos según Belding y Hatch.**

<b>Actividad</b>	<b>Energía (w)</b>
Durmiendo	75
Sentado tranquilamente	120
Trabajo ligero	
· Oficina	130-160
· Conduciendo	160-190
· De pie trabajo ligero	160-190
Trabajo Moderado	
· Sentado, movimiento intenso manos, cuerpo y piernas	190-230
· De pie con algún desplazamiento	230-290
· Levantamiento y transporte moderado de pesos.	290-400
Trabajo intenso	430-600

*(Valores calculados para un hombre de 70 kg., 1.82 m<sup>2</sup> superficie de piel, 1.73 altura y actividad continuada. Cit. González, 1986, p. 44)*

- El Intercambio térmico entre el cuerpo y el ambiente se produce por las diferencias de calor con el entorno, aunque la vestimenta desempeña un importante papel como factor de modificación. Existen tres procesos de intercambio que actúan simultáneamente: entre la ropa y el exterior, entre el cuerpo y la ropa y entre las partes descubiertas y el exterior; por ello, para un hombre desnudo la estimación del balance es más simple, ya que solo intervienen la temperatura de la superficie del cuerpo, la temperatura y velocidad del aire y la temperatura radiante de las superficies que rodean al individuo.

La integración de la vestimenta en el proceso de intercambio se realiza mediante la definición de una unidad de aislamiento, denominada **clo**, cuyo valor es 0.6 m<sup>2</sup>. °C/w.

Experimentalmente se ha establecido la equivalencia entre diferentes tipos de vestimenta y esta unidad de aislamiento, tal y como aparecen en el tabla 2.3.

**Tabla 2.3. Equivalencia entre vestido y clo.**

<b>Vestimenta</b>	<b>Clo</b>
Desnudo	0
Pantalón corto	0.1
Traje veraniego	0.5
Traje masculino de calle	1
Conjunto femenino de invierno	0.7 - 0.9
Traje masculino de invierno	2 - 2.5

La temperatura del aire es el factor que influye de manera más directa sobre el bienestar, además de ella intervienen la humedad, la velocidad del viento.

La humedad regula la evaporación, por lo que desempeña un importante papel en las altas temperaturas, en las que la sudoración es uno de los mecanismos más importantes de enfriamiento.

Sin embargo existen unos límites extremos que pueden ser negativos: por debajo del 20% de humedad, aumenta el peligro de infección por la sequedad de las mucosas; con temperaturas bajas, el aire muy seco aumenta el discomfort y en situaciones cálidas, cuando la humedad sobrepasa el 60% y, sobre todo, el 80%, la sensación de calor aumenta, ya que se produce el sudor, pero no evaporación, dando lugar al clásico bochorno o calor húmedo, bastante más incómodo que el calor seco (Tabla 2.4).

**Tabla 2.4. Sensación térmica en función de la humedad relativa del aire.**

<b>Temp.</b>	<b>Humedad Relativa en %</b>					
	30	50	70	80	90	100
20	20	21.1	22.2	22.8	23.4	23.9
25	25	26.7	27.8	28.9	30	21.1
30	30	32.2	35	37.2	37.8	39.4
35	35	38.8	42.2	44.4	46.7	48.9
40	40	45	50			

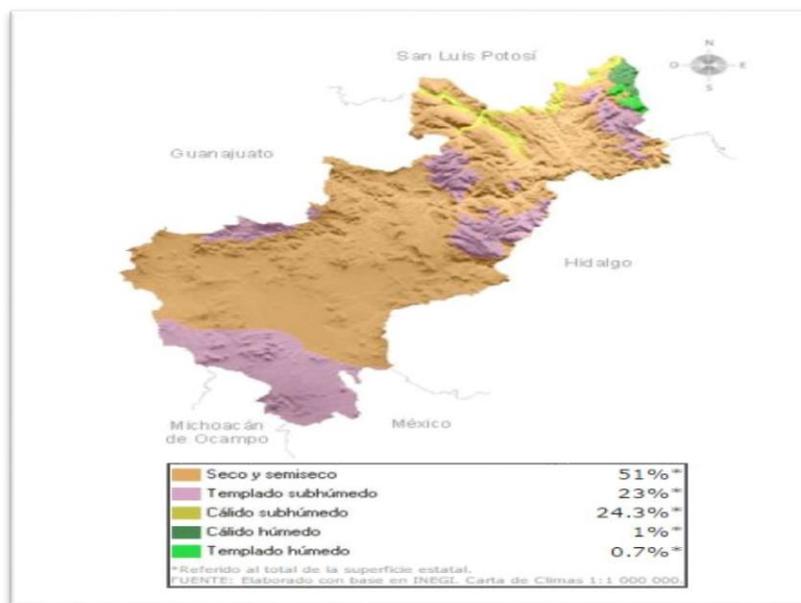
El movimiento del aire aumenta la disipación de energía por evaporación o convección, siempre que la temperatura de la piel sea inferior a la del aire. No obstante, cuando las temperaturas son superiores a 40°C, el viento aumenta la sensación de calor.

### III. METODOLOGÍA

#### 3.1 Experimento

##### 3.1.1 Área de estudio

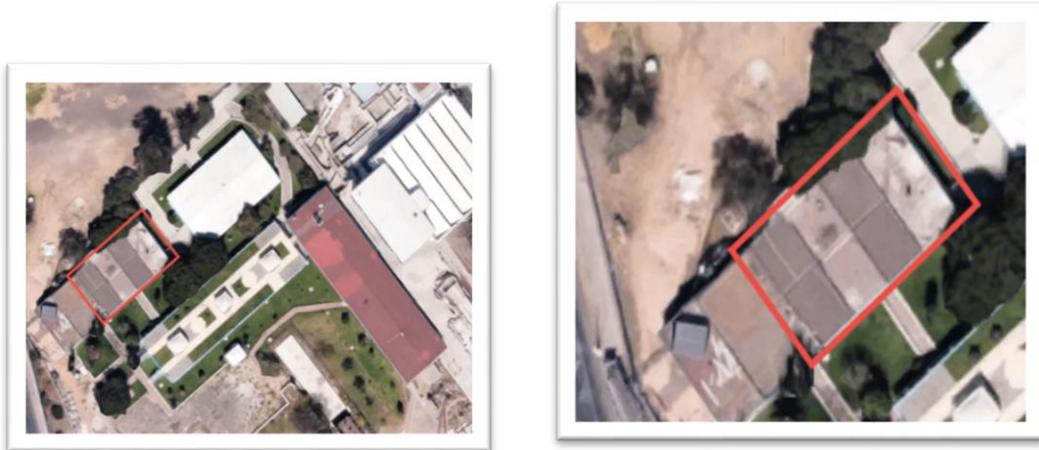
El experimento tuvo lugar en el municipio de Santiago de Querétaro, el 51% de la superficie del estado presenta clima seco y semiseco localizado en la región centro; el 24.3% presenta clima cálido subhúmedo en la región de la Sierra Madre Oriental; el 23% presenta clima templado subhúmedo localizado en la región sur, centro y noreste; el 1% presenta clima cálido húmedo hacia el noreste y el restante 0.7% presenta clima templado húmedo al noreste de estado (figura 3.1).



**Figura 3.1. Mapa de clima del estado de Querétaro.**

La temperatura media anual del estado es de 18°C, la temperatura máxima promedio es de 28°C y se presenta en los meses de abril y mayo, la temperatura mínima promedio es de 6°C durante el mes de enero. La precipitación media estatal es de 570 mm anuales, las lluvias se presentan en verano en los meses de junio a septiembre.

El área de estudio se llevó a cabo en el edificio de la escuela de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro (imagen 3.2 y 3.3).



**Figura 3.2. Aulas del edificio del estudio, vista planta**



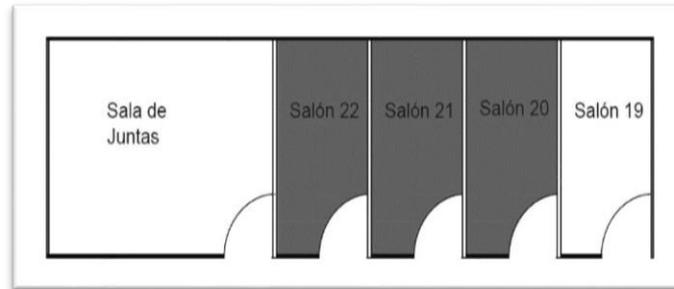
**Figura 3.3. Aulas del edificio del estudio, vista sur.**

La ciudad de Santiago de Querétaro, se caracteriza por tener un clima seco y semiseco, las temperatura son altas en verano y frías notables en invierno, la temperatura máxima en promedio no rebasa los  $35^{\circ}\text{C}$  y la temperatura en fría en promedio es de  $5$  a  $-1^{\circ}\text{C}$ , el periodo de precipitaciones se comprende de mayo hasta octubre, el promedio de precipitación es de  $600$  a  $700$  mm.

La estructura de edificio cuenta con cuatro aulas, una sala de reuniones, una sala de control, y un taller de cerámica.

Las cuatro aulas tiene una superficie de  $48\text{m}^2$ , la sala de reuniones una superficie de  $56\text{m}^2$ , el taller de cerámica al igual que la sala de control  $16\text{m}^2$ . El edificio cuenta con una losa de concreto de  $12$  cms de espesor, esta capa tiene un resistencia de  $300\text{ kg/cm}^2$ , las paredes laterales están compuesta con tabiques, las cuatro aulas cuentas dos ventanales

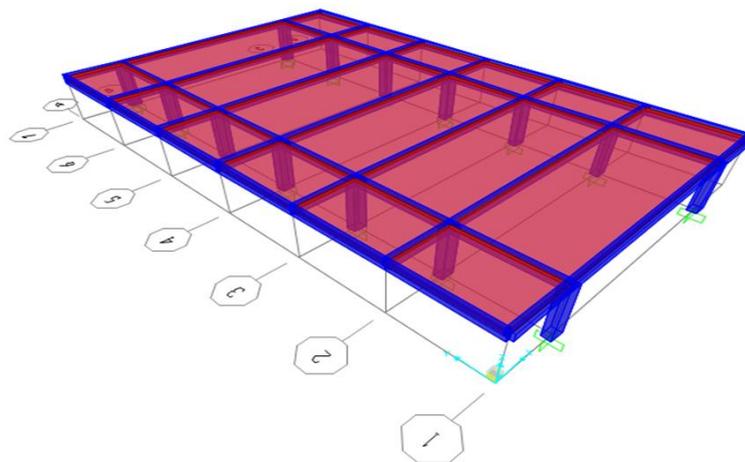
a los laterales de 2 x 4 m, las paredes que dividen las aulas son bloques de concreto revestida con mortero. Para este estudio comparativo se consideran únicamente las cuatro aulas como referencia por ser idénticas estructuralmente (Figura 3.4).



**Figura 3.4. Vista en planta del edificio.**

### **3. 1. 2 Análisis estructural del edificio**

El edificio consta de una planta construido a base de columnas, traveses y losas de concreto, con un voladizo de 2.20 m de longitud a lo largo de todo su perímetro. Tomando en cuenta los volados existentes la superficie de azotea es aproximadamente de 245 m<sup>2</sup>. La distancia transversal entre ejes de columnas es de 8 m y la distancia longitudinal entre ejes de los marcos (columna-trabe-columna) es de 3.30 m. Se considera analizar únicamente la estructura correspondiente a los salones 19, 20, 21 y 22; ya que es la zona de interés del edificio por ser donde se encuentran instalados los techos verdes, esta zona del edificio consta de 7 marcos rígidos de concreto, cabe destacar que el espesor de las losas es de 12 cm (figuras 3.5, 3.6 y 3.7).



**Figura 3.5. Modelo estructural idealizado en SAP 2000.**

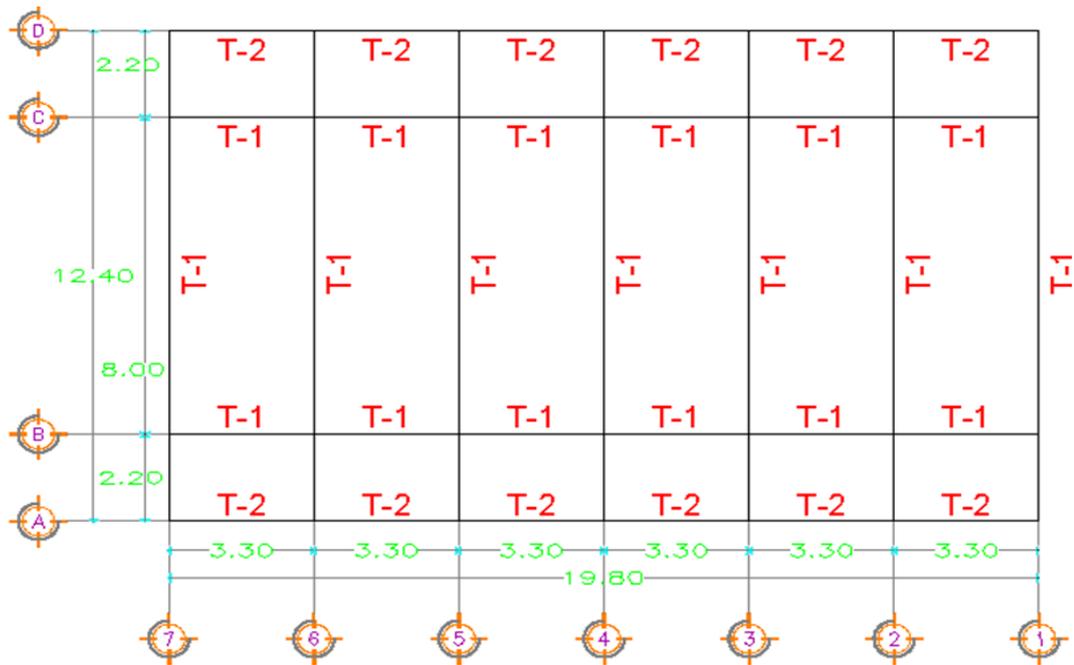


Figura 3.6. Vista en planta de la estructura.

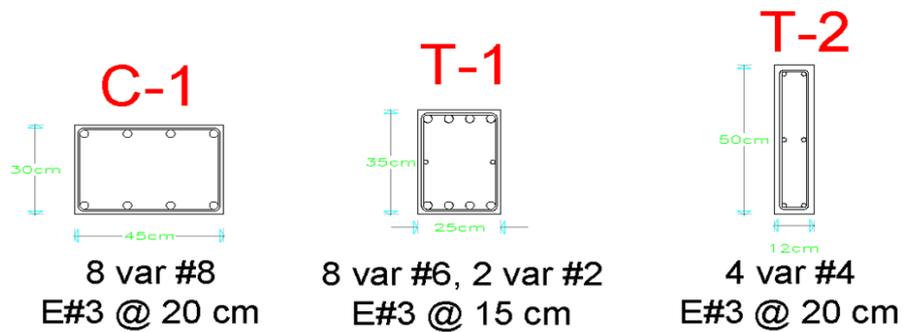


Figura 3.7. Secciones de los elementos estructurales (concreto  $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$ ).

Para realizar el análisis de cargas se tomaron en cuenta los siguientes aspectos para su diseño:

#### Cargas vivas

- Carga viva instantánea 90 kg/m<sup>2</sup>
- Carga media 70 kg/m<sup>2</sup>
- Carga máxima 170 kg/m<sup>2</sup>

Para un total de 330 kg/m<sup>2</sup>

**Cargas Muertas (Techo verde, esp. 10 cm,  $\gamma=1500 \text{ kg/m}^2$ )**

- Sobrecarga por sistema de techo verde 650 kg/m<sup>2</sup>
- Losa maciza (12 cm espesor) 288 kg/m<sup>2</sup>
- Sobrecarga por mortero y concreto 40 kg/m<sup>2</sup>
- Piso terrazo 80 kg/m<sup>2</sup>
- Peso de Instalación-Plafón 30 kg/m<sup>2</sup>
- Peso muros divisorios 90 kg/m<sup>2</sup>

Para un total de 1178 kg/m<sup>2</sup>

**Cargas Muertas (Techo verde, esp. 15 cm,  $\gamma=1500$  kg/m<sup>2</sup>)**

- Sobrecarga por sistema de techo verde 725 kg/m<sup>2</sup>
- Losa maciza (12 cm espesor) 288 kg/m<sup>2</sup>
- Sobrecarga por mortero y concreto 40 kg/m<sup>2</sup>
- Piso terrazo 80 kg/m<sup>2</sup>
- Peso de Instalación-Plafón 30 kg/m<sup>2</sup>
- Peso muros divisorios 90 kg/m<sup>2</sup>

Para un total de 1253 kg/m<sup>2</sup>

**Cargas Muertas (Techo verde, esp. 25 cm,  $\gamma=1500$  kg/m<sup>2</sup>)**

- Sobrecarga por sistema de techo verde 875 kg/m<sup>2</sup>
- Losa maciza (12 cm espesor) 288 kg/m<sup>2</sup>
- Sobrecarga por mortero y concreto 40 kg/m<sup>2</sup>
- Piso terrazo 80 kg/m<sup>2</sup>
- Peso de Instalación-Plafón 30 kg/m<sup>2</sup>
- Peso muros divisorios 90 kg/m<sup>2</sup>

Para un total de 1403 kg/m<sup>2</sup>

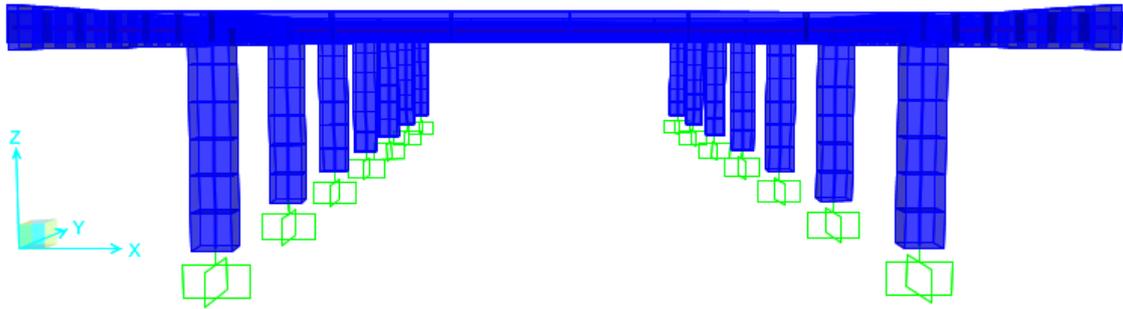
La carga total de diseño se considera como la suma de la carga viva y la carga muerta figura 3.8. (Tomar en cuenta que el peso propio de la estructura se encuentra implícito en la carga muerta).

Para la combinación de Estado Límite de Servicio se consideró (figura 3.9):

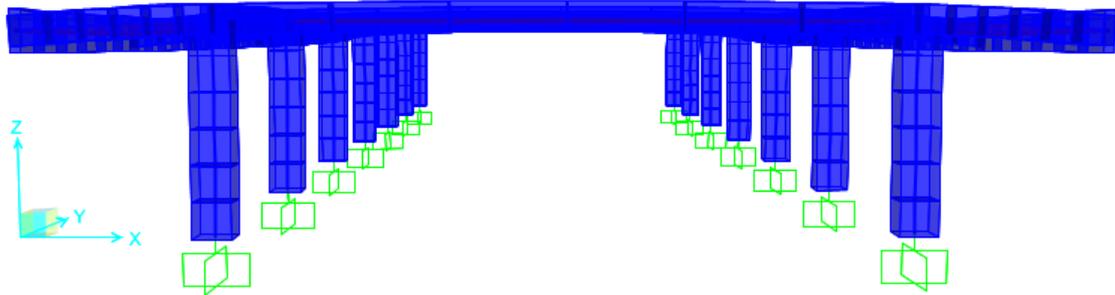
$$ELS = 1.0 CV + 1.0 CM$$

Para la combinación de Estado Límite Ultimo se consideró (figura 3.10):

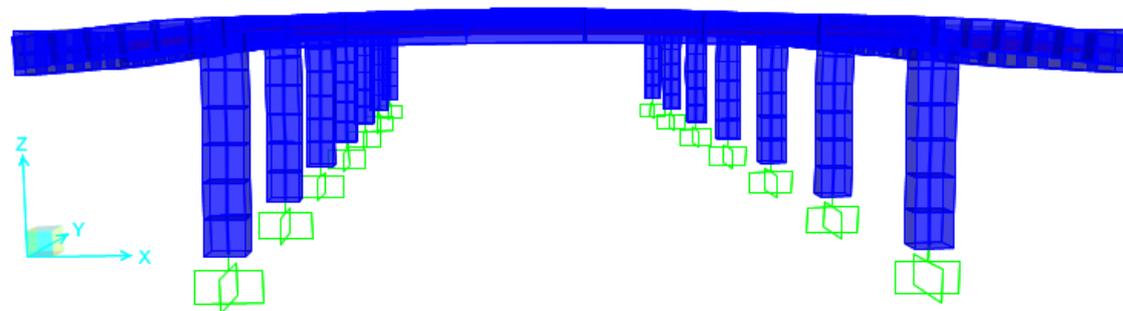
$$ELU = 1.4 CV + 1.4 CM$$



**Figura 3.8. Estructura antes de la aplicación de carga.**



**Figura 3.9. Estructura después de la aplicación de carga (Combinación de Estado Límite de Servicio).**



**Figura 3.10. Estructura después de la aplicación de carga (Combinación de Estado Límite Ultimo).**

La tabla siguiente nos muestran las deflexiones máximas que se presentan el techo con las combinaciones de cargas realizadas, así como también las deflexiones máximas permitidas.

**Tabla 3.1. Deflexiones máximas en los techos verdes.**

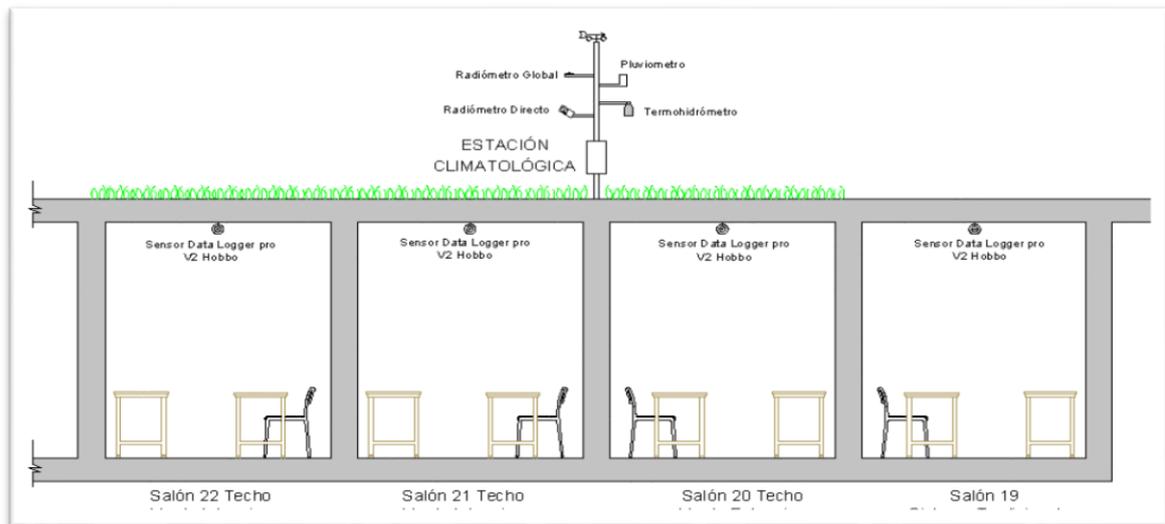
Eje	Tramo	Combinación de Carga	Deflexión Máxima (cm)	Deflexión Máxima Permitida (cm)
1	A - B	E.L.S.	0.35	2.83
	A - B	E.L.U.	0.49	2.83
	B - C	E.L.S.	0.50	3.83
	B - C	E.L.U.	0.70	3.83
	C - D	E.L.S.	0.35	2.83
	C - D	E.L.U.	0.49	2.83
2	A - B	E.L.S.	0.45	2.83
	A - B	E.L.U.	0.64	2.83
	B - C	E.L.S.	0.86	3.83
	B - C	E.L.U.	1.20	3.83
	C - D	E.L.S.	0.45	2.83
	C - D	E.L.U.	0.64	2.83
3	A - B	E.L.S.	0.51	2.83
	A - B	E.L.U.	0.72	2.83
	B - C	E.L.S.	1.01	3.83
	B - C	E.L.U.	1.41	3.83
	C - D	E.L.S.	0.51	2.83
	C - D	E.L.U.	0.72	2.83
4	A - B	E.L.S.	0.54	2.83
	A - B	E.L.U.	0.76	2.83
	B - C	E.L.S.	1.09	3.83
	B - C	E.L.U.	1.51	3.83
	C - D	E.L.S.	0.54	2.83
	C - D	E.L.U.	0.76	2.83
5	A - B	E.L.S.	0.57	2.83
	A - B	E.L.U.	0.80	2.83
	B - C	E.L.S.	1.14	3.83
	B - C	E.L.U.	1.60	3.83
	C - D	E.L.S.	0.57	2.83
	C - D	E.L.U.	0.80	2.83
6	A - B	E.L.S.	0.54	2.83
	A - B	E.L.U.	0.76	2.83
	B - C	E.L.S.	1.06	3.83
	B - C	E.L.U.	1.49	3.83
	C - D	E.L.S.	0.54	2.83
	C - D	E.L.U.	0.76	2.83
7	A - B	E.L.S.	0.44	2.83
	A - B	E.L.U.	0.61	2.83
	B - C	E.L.S.	0.67	3.83
	B - C	E.L.U.	0.94	3.83
	C - D	E.L.S.	0.44	2.83

C - D	E.L.U.	0.61	2.83
-------	--------	------	------

Las deflexiones máximas permitidas se presentaron en el eje 5, como se muestra en la tabla, sin embargo ninguna rebasa la deflexión máxima permitida, por lo que el peso adicional de los techos verdes, no afecta en la carga máxima que el techo puede soportar.

### 3. 1. 3 Instrumentos de monitoreo

Para medir las variables climáticas en el interior de las aulas se instalaron sensores de temperatura, en la parte superior del techo a una distancia de suelo a techo de 2.9 m. Para las variables exteriores como son, humedad, temperatura, radiación solar, dirección y velocidad del viento, se utilizó una estación climatológica, ubicada en el techo del edificio a estudiar (figura 3.11).



**Figura 3.11 Vista en corte del área de aplicación de los techos verdes.**

Se utilizaron data loggers tipo Hobo marca Onset, modelo U23 Pro V2 en cada salón, los cuales tiene la función de registrar la humedad relativa y la temperatura la interior del edificio, estos sensores se adapta a un acoplador y después a una Estación Base USB Optica-T-4, y los datos registrados en los data loggers se descargan directamente a la computadora a través de un cable USB (figura 3.12).



**Figura 3.12. Esquema de instrumentación de monitoreo**

## **3. 2 Materiales y métodos**

### **3. 2. 1 Caracterización del sustrato**

Los materiales utilizados para la caracterización del sustrato del techo verde se utilizó 60% arcilla con materia orgánica y 40% de arena pómez, esta combinación nos proporciona las características de las arcillas como son la concentración de los nutrientes, así como la retención de agua debido al tamaño de sus partículas y su estructura; la arena pómez al igual que la materia orgánica, le proporciona partículas de mayor tamaño que permiten que las raíces de la planta se desarrolle y se muevan libremente para poder obtener los nutriente y permiten al sustrato obtener los nutrientes y permita al sustrato un flujo de aire. Estos materiales son obtenidos a nivel local y se utilizan en su forma original en los experimentos (imagen 3.13).



**Figura 3.13. Materiales puestos en el lugar de estudio.**

Para el desarrollo de esta investigación se requiere caracterizar los materiales para tener conocimiento sobre su posible comportamiento, y variar la irrigación con base a esto. Los datos requeridos para la caracterización del sustrato incluyen la humedad, densidad aparente, densidad real, la permeabilidad los cuales se definen de la siguiente manera:

- Humedad relativa

$$w = \frac{W_w}{W_s} * 100 (\%)$$

Donde  $w$ , es el contenido de humedad expresado en %,  $W_w$  es el peso del agua existente en la masa del suelo,  $W_s$  peso de las partículas sólidas.

- Densidad aparente.

$$Da = \frac{P_{ss}}{V_t}$$

Donde  $D_a$  es la densidad aparente de suelo en gr/cm<sup>3</sup>,  $D_r$  es peso de suelo seco en gr y  $V$  es volumen total de la muestra en cm<sup>3</sup>.

- Porosidad del sustrato.

$$P = \left[ \frac{(D_a - D_r)}{D_a} \right] * 100$$

Donde  $P$  es la porosidad del volumen total de la muestra en %,  $D_a$  la densidad aparente del suelo en gr/cm<sup>3</sup>, y  $D_r$  la densidad real del suelo también en gr/cm<sup>3</sup>.

Se efectuaron las pruebas en el laboratorio de la misma Facultad de Ingeniería, se llevaron a cabo pruebas de densidad, humedad, permeabilidad, así como un análisis granulométrico, para ver las propiedades de dichos materiales. Estos materiales son obtenidos a nivel local y se utilizan en su forma original en los experimentos. Las características de los materiales para el sustrato, así como la mezcla de ellos se muestran en la tabla 3.2.

**Tabla 3.2. Características de los materiales y del sustrato para el techo verde.**

Parámetros	Sustrato (Mezcla)	Arena Pómez	Arcilla con materia orgánica
Humedad (%)	36.45	38.94	49.75
Densidad(kg/cm <sup>3</sup> )	1.63	1.05	1.10
Permeabilidad (cm/s)	7.5 X10 <sup>-4</sup>	8.7x10 <sup>-3</sup>	9.6 X10 <sup>-5</sup>

### 3. 2. 2 Selección y características de la vegetación

Estudios proclamaron que el uso de diversos tipos de plantaciones podría ser útil para maximizar la eficacia de los techos verdes (Wolf 2008, Nagase y Dunnett, 2010); sin embargo, la selección del tipo del vegetación debe ser establecido por las condiciones climáticas (Blanusa et al., 2013).

Es fundamental al momento de elegir una vegetación considerar que ésta, se adapte a la zona climática propia del lugar donde se vaya a instalar el sistema, ya que como se va a encontrar a la intemperie, es esencial que las especies toleren las inclemencias del tiempo, también es de vital importancia el hecho de que requieran poco mantenimiento en cuanto a riego y poda. La elección del tipo de vegetación de especie va a depender del

lugar donde se encuentre situado el edificio, así como de su orientación y de la exposición de sus techos (sombra, pleno sol).

Para este estudio se eligió una vegetación de la localizada en la región llamada *Aptenia cordifolia* conocida ampliamente como rocío o escarcha la cual se muestra en la, pertenece a la familia de las aizoáceas, son plantas suculentas, las cuales tiene las características de desarrollar tallos u hojas gruesas y carnosos para almacenar el agua, esta succulencia o engrosamiento es un fenómeno de adaptación que se produce en ecosistemas donde las precipitaciones son muy escasas, muy irregulares, o donde la tierra tiene poca capacidad de almacenar el agua (figura 3.14).

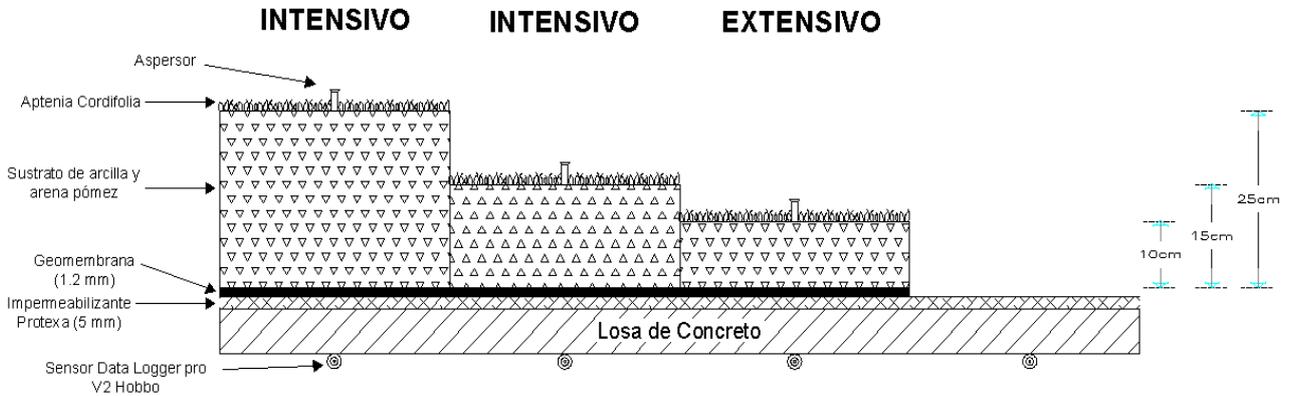


**Figura 3.14. Foto de la planta *Aptenia cordifolia*.**

Este tipo de vegetación se adaptan principalmente a vivir en zonas secas y donde hay poca presencia de precipitaciones como es el caso del estado de Querétaro, ya que han desarrollado estrategias para acumular agua, otra de sus características es la presencia de una abundante pelosidad que, además de protegerles del calor, es capaz de disminuir la transpiración. La planta de rocío florece en verano, el riego que necesita es moderado en primavera y verano y si hace mucho frio puede permanecer semanas sin regar, su reproducción es muy sencilla es mediante semillas o esqueje.

### **3. 2. 3 Instalación de sustratos**

Para el estudio comparativo de las aulas se consideran: un techo tradicional, un techo verde extensivo y dos techos verdes intensivos; (salones 19, 20, 21 y 22 respectivamente) todos ubicados en el edificio H del área de Posgrado de la Facultad de Ingeniería (figura 3.15).



**Figura 3.15. Esquema de techos verdes y techo tradicional.**

El techo del edificio recibió una limpieza general (figura 3.16).



**Figura 3.16. Foto limpieza general del techo.**

Se cubrió de una capa de impermeabilizante Protexa (figura 3.17), seguido con una capa de geomembrana la cual es una película plastificada de 1.2 mm que sirve como colchón protector entre la capa del sustrato y el concreto (figura 3.18).



**Figura 3.17. Foto colocación de impermeabilizante**



**Figura 3.18. Foto colocación de geomembrana.**

Después se coloca un sistema de riego por medio de tubería PVC de 1/2", al centro de cada sustrato se coloca un aspersor, los cuales cubren el área total a regar (figura 3.19). El sistema de riego se conecta a una cisterna de agua reciclada

Posteriormente se colocan 10 cm de espesor del sustrato en el salón 20, 15 cm en el salón 21 y 25 cm en el salón 22 y en la parte superior se coloca la capa de vegetación, *Aptenia cordifolia*.



**Figura 3.19. Foto de colocación de sistema de riego, sustrato y vegetación.**

#### **IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

Este estudio explora la influencia que tiene los techos verdes sobre el confort térmico, se realizó el estudio comparativo del techo tradicional y de los techos verdes intensivos y extensivos.

##### **4.1 Monitoreo de techos verdes**

###### **4.1.1. Primer monitoreo de las variables internas, enero-marzo 2015.**

El monitoreo para el análisis del desempeño de los techos verdes, se llevó a cabo en el periodo comprendido de enero a noviembre del 2015, en condiciones normales, es decir, en periodo de clases y vacaciones.

En el primer monitoreo de los meses de enero a marzo, los techos verdes se encontraban en el proceso de colocación del sustrato, ya se había realizado la caracterización del sustrato, así como la limpieza del área de estudio, quedando pendiente el sistema de riego y la colocación de la vegetación a evaluar.

El primer monitoreo de temperatura y humedad relativa al interior de los salones, empieza el día 26 de enero del 2015 a las 04:00 pm y termina el día 27 de marzo a las 03:00 pm con un intervalo de registro de datos de 5 minutos, los datos obtenidos de los salones de estudio 20, 21, 22 se registran en la siguientes tablas (4.1 y 4.2)

**Tabla 4.1. Registros de la variable de temperatura interna, en el primer monitoreo comprendido entre los meses de enero y marzo 2015.**

Salón	Tipo de Techo	Espesor (cm)	Núm. de muestras	Temp máx °C	Temp min °C	Temp prom °C	Desv estándar ( $\sigma$ )	Hra de la primera muestra	Hra de la última muestra
20	Extensivo	10	17275	29.19	13.93	22.674	3.361	4:00 PM	3:00 PM
21	Intensivo	15	17275	25.137	15.461	20.917	1.891	4:00 PM	3:00 PM
22	Intensivo	25	17275	25.793	15.27	20.578	1.963	4:00 PM	3:00 PM

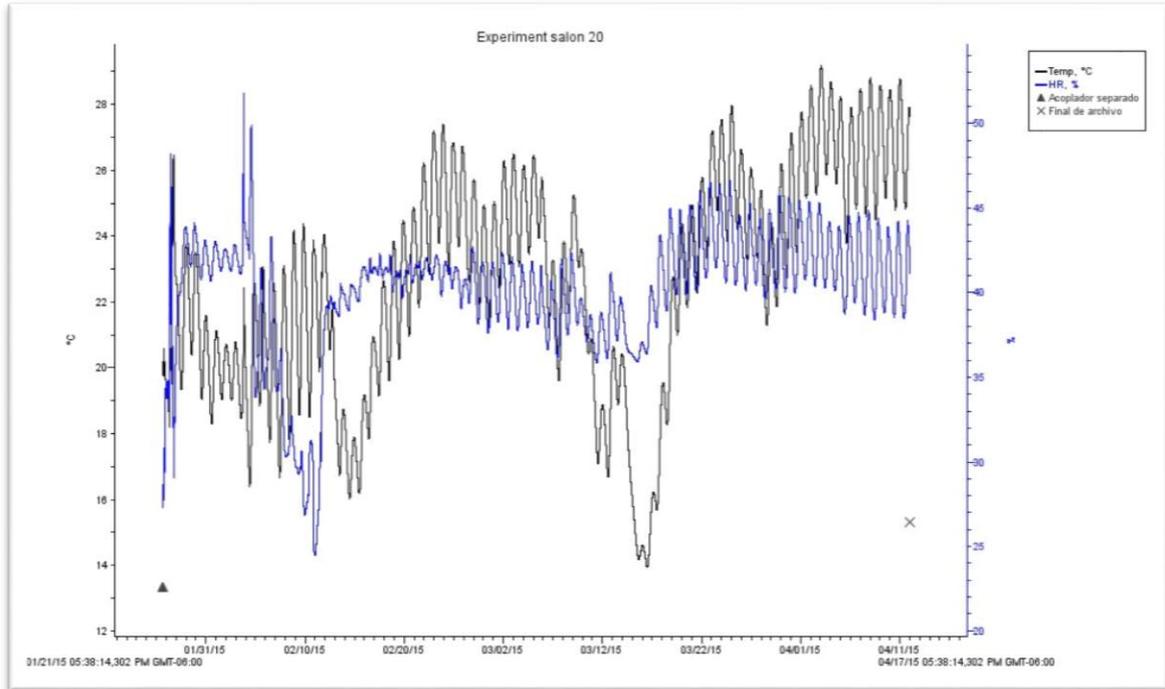
**Tabla 4.2. Registros de la variable de humedad relativa interna, en el primer monitoreo comprendido entre los meses de enero y marzo 2015.**

Salón	Tipo de Techo	Espesor (cm)	Núm. de muestras	Hum máx %	Hum min %	Hum prom %	Desv estándar ( $\sigma$ )	Hra de la primera muestra	Hra de la última muestra
20	Extensivo	10	17275	51.803	24.272	40.077	3.588	4:00 PM	3:00 PM
21	Intensivo	15	17275	80.857	18.858	47.901	11.232	4:00 PM	3:00 PM
22	Intensivo	25	17275	77.81	19,549	47.41	10.387	4:00 PM	3:00 PM

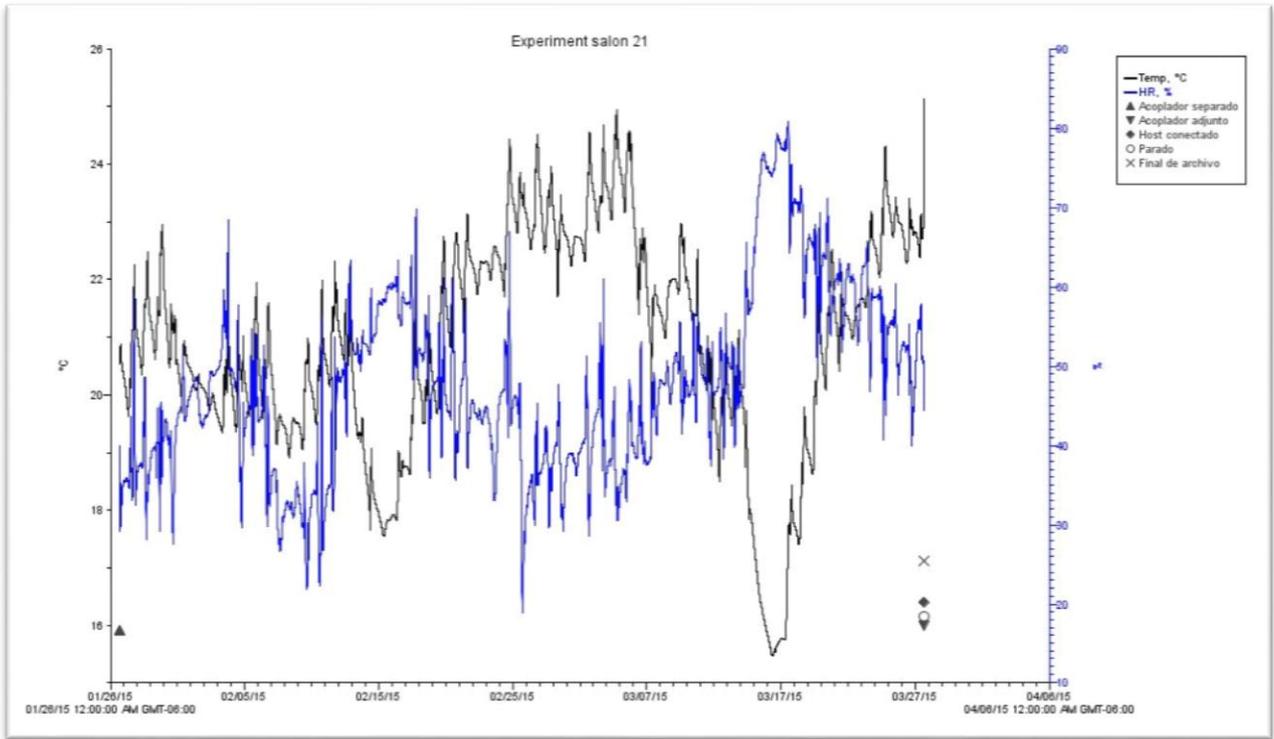
La tabla 4.1 nos muestra las variaciones de la temperatura al interior de los 3 salones de estudio, en el salón 20 el cual tiene el techo verde extensivo con un espesor de 10 cms se registró una temperatura máxima de 29.19 °C, a comparación de los techos verdes intensivos de 15 y 25 cm en los salones 21 y 22 respectivamente los cuales registraron temperaturas máximas similares de 25.137 °C, y 25.793 °C respectivamente solo por décimas más bajas la del salón 22.

La tabla 4.2 nos indica como varió la humedad relativa al interior de los salones a estudiar, la máxima fue de 80.86% y se registró en el salón 21 con techo verde intensivo, continuando el salón 22 con 77.81% y por último el salón 20 con techo verde extensivo registrando 51.80%.

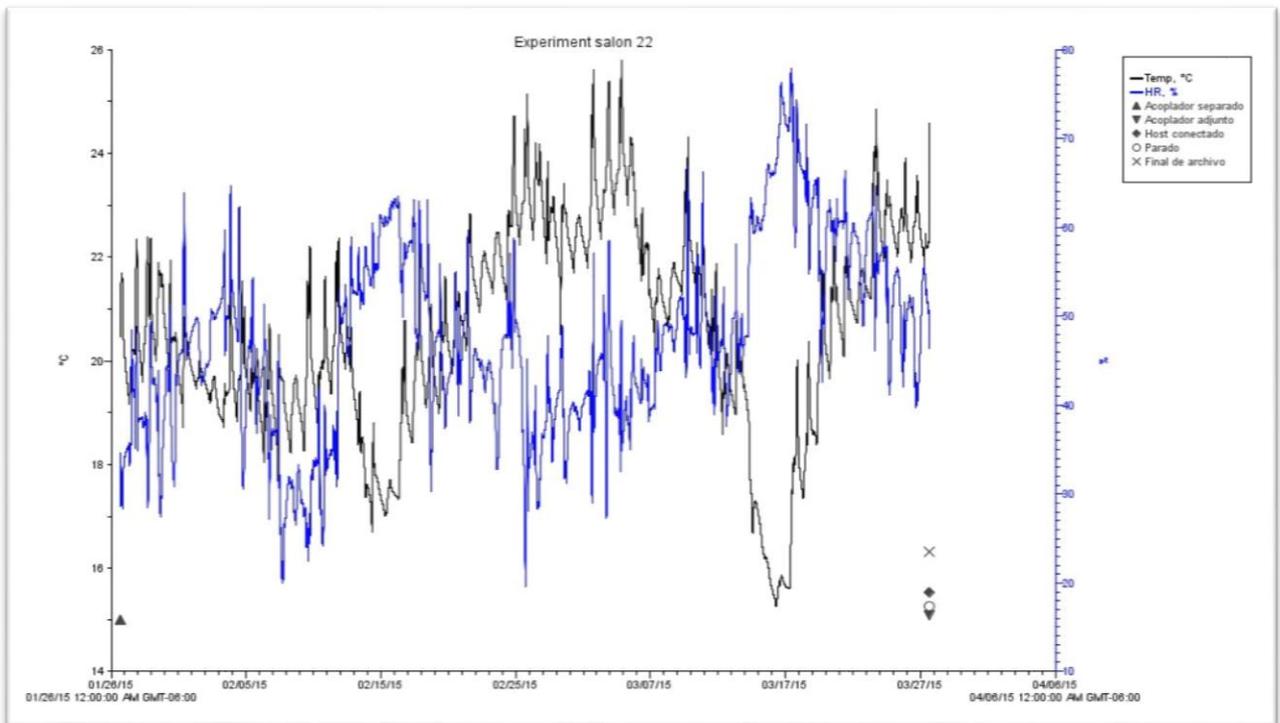
Las figuras 4.1, 4.2 y 4.3 siguientes nos muestran las variaciones de humedad relativa y temperatura interna, por cada salón en el primer monitoreo registrado en los meses de enero a marzo del 2015.



**Figura 4.1. Graficas de las variables de temperatura y humedad al interior del salón 20 (techo extensivo, 10 cms).**



**Figura 4.2. Graficas de las variables de temperatura y humedad al interior del salón 21 (techo intensivo, 15 cms).**



**Figura 4.3. Graficas de las variables de temperatura y humedad al interior del salón 22 (techo intensivo, 25 cms).**

#### 4.1.2. Segundo monitoreo de las variables internas, marzo – mayo 2015.

Se continuaron tomando datos de las variables internas de los salones, con las mismas condiciones, en las que se encontraban en el primer periodo del monitoreo, es decir todavía falta la colocación de la vegetación y el sistema de riego. Los datos obtenidos se plasman en las siguientes tablas 4.3 y 4.4. En el salón 20, se presentó un problema con el sensor por lo que se tuvo que cambiar y no tenemos datos registrados en este periodo.

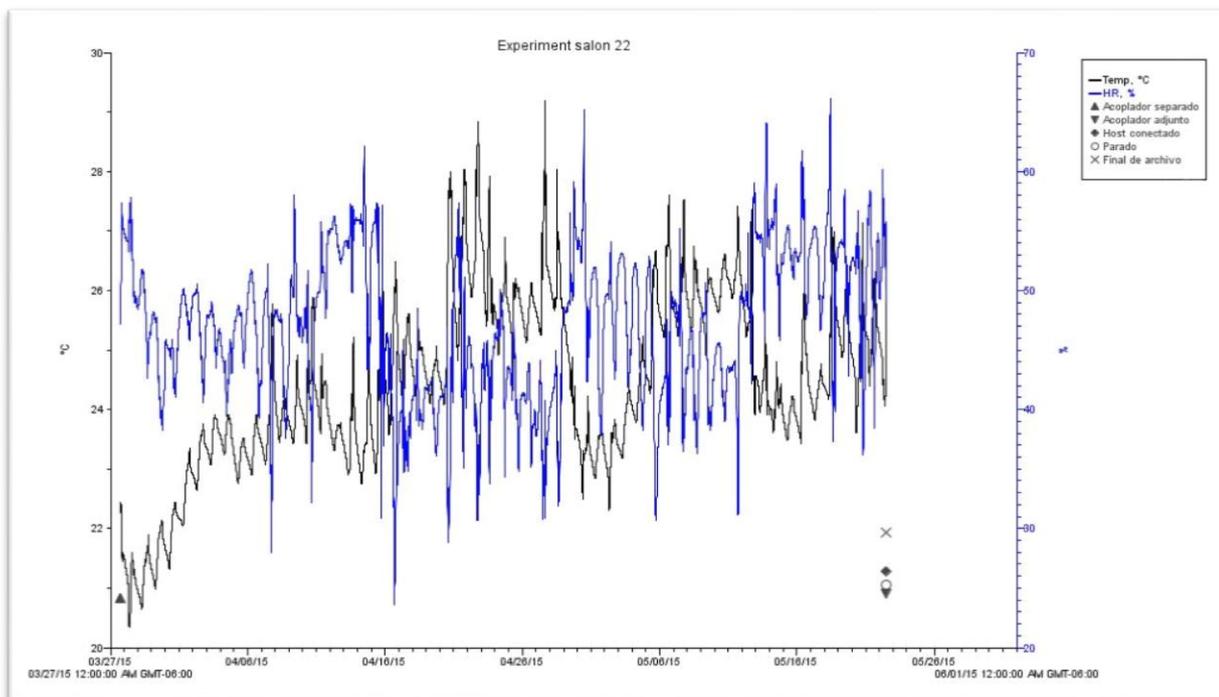
**Tabla 4.3. Registros de la variable de temperatura interna, en el segundo monitoreo comprendido entre los meses de marzo y mayo de 2015.**

Salón	Tipo de Techo	Espesor (cm)	Núm. de muestras	Temp máx. °C	Temp min °C	Temp prom °C	Desv estándar ( $\sigma$ )	Hra de la primera muestra	Hra de la última muestra
20	Extensivo	15	16078	29.19	20.341	24.456	1.453	5:00 PM	12:30 PM
21	Intensivo	20	16078	28.122	21.079	24.587	1.31	5:00 PM	12:30 PM
22	Intensivo	25	16078	29.19	20.341	24.456	1.453	5:00 PM	12:30 PM

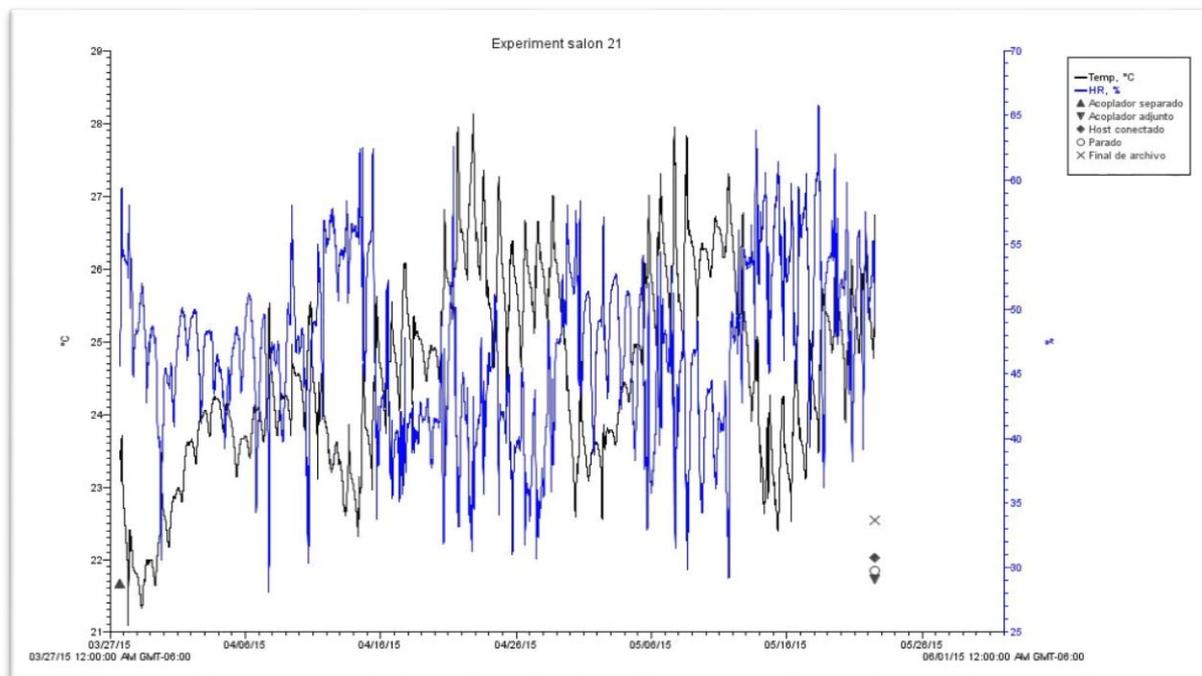
**Tabla 4.4. Registros de la variable de humedad relativa interna, en el segundo monitoreo comprendido entre los meses de marzo y mayo de 2015.**

Salón	Tipo de Techo	Espesor (cm)	Núm. de muestras	Hum máx. %	Hum min %	Hum prom %	Desv estándar ( $\sigma$ )	Hra de la primera muestra	Hra de la última muestra
20	Extensivo	15	16078	66.173	24	46.898		5:00 PM	12:30 PM
21	Intensivo	20	16078	65.736	28.025	46.689	6.384	5:00 PM	12:30 PM
22	Intensivo	25	16078	66.173	24	46.898	6.079	5:00 PM	12:30 PM

Las figuras siguientes nos muestran las variaciones de humedad relativa y temperatura interna, por cada salón en el segundo monitoreo registrado en los meses de marzo a mayo del 2015.



**Figura 4.4. Graficas de las variables de temperatura y humedad al interior del salón 22 (techo intensivo, 25 cm).**



**Figura 4.5. Graficas de las variables de temperatura y humedad al interior del salón 21 (techo intensivo, 15 cm).**

### 4.1.3. Monitoreo mensuales de las variables internas.

Los siguientes monitoreos se realizaron mes por mes, empezando en los meses de mayo – junio, junio – julio, julio - agosto, agosto - septiembre y septiembre – octubre.

#### 4.1.3.1. Mes de Mayo -Junio

En la tabla 4.5 se muestra las variaciones de temperatura, y en la tabla 4.6 las variaciones de humedad relativa, en el periodo comprendido en el mes de mayo a junio.

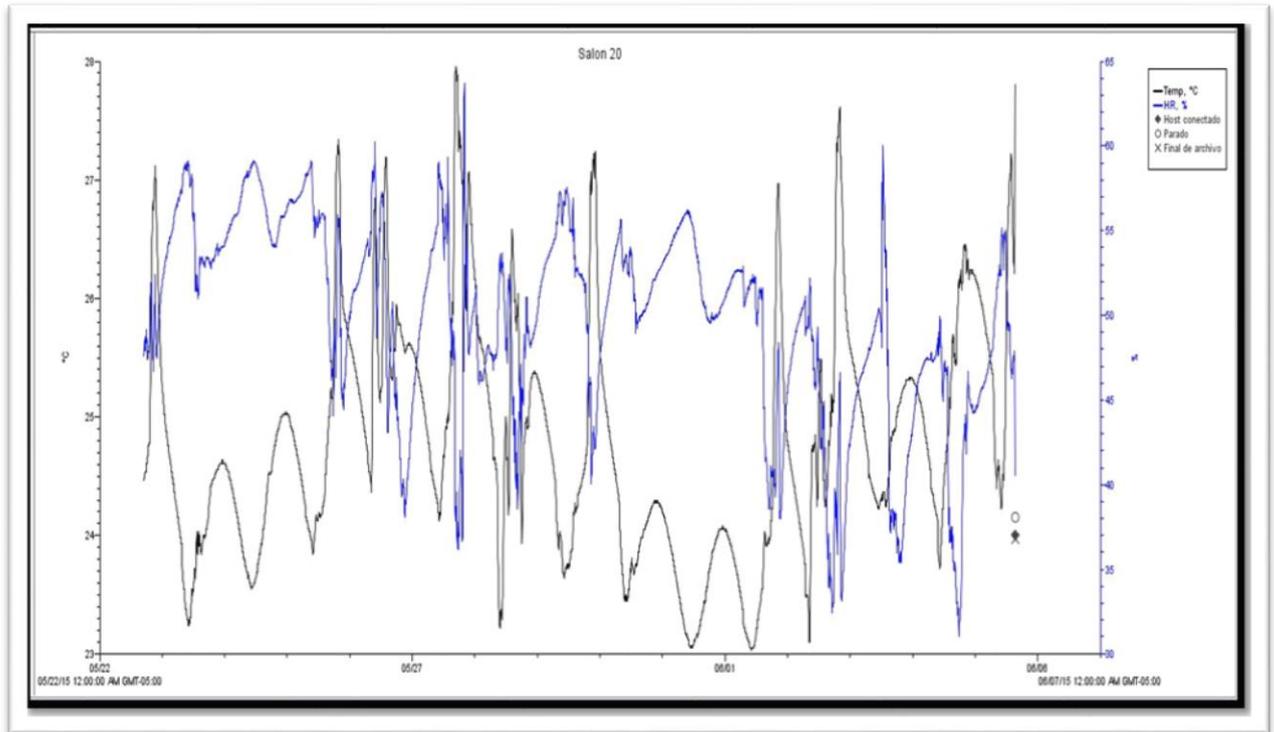
**Tabla 4.5. Registros de la temperatura en el interior de las aulas, en el periodo de mayo y junio.**

Salón	Tipo de Techo	Espesor (cm)	Núm. de muestras	Temp máx. °C	Hra y fecha de la muestra máx.	Temp min. °C	Hra y fecha de la muestra min	Temp prom °C	Desv estándar ( $\sigma$ )
20	Extensivo	15	4011	27.955	27 de mayo; 04:50 pm	23.021	31 de mayo; 10:40 am	24.786	0.983
21	Intensivo	20	4011	27.161	05 de junio; 03:15 pm	23.088	01 de junio; 10:05 am	24.639	0.693
22	Intensivo	25	4011	26.451	27 de mayo; 04:55 pm	22.944	01 de junio; 07:45 am	24.544	0.701

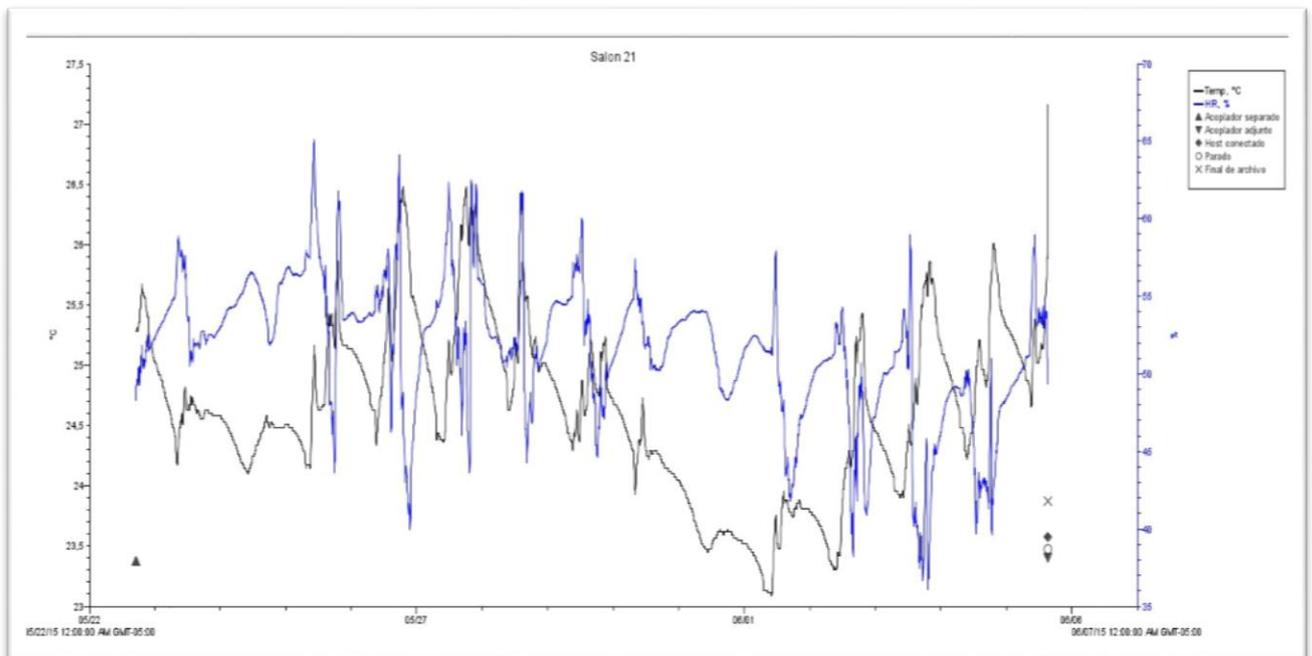
**Tabla 4.6. Registros de la humedad relativa en el interior de las aulas, en el periodo de mayo y junio.**

Salón	Tipo de Techo	Espesor (cm)	Núm. de muestras	Hum máx. %	Hra y fecha de la muestra máx.	Hum min %	Hra y fecha de la muestra min	Hum prom %	Desv estándar ( $\sigma$ )
20	Extensivo	15	4011	63.721	27 de mayo; 08:00 pm	31.009	04 de junio; 05:45 pm	49.864	5.768
21	Intensivo	20	4011	65.12	25 de mayo; 10:35 am	36.059	03 de junio; 07:25 pm	51.592	4.325
22	Intensivo	25	4011	63.161	27 de mayo; 08:05 pm	36.447	04 de junio; 05:45 pm	51.549	4.155

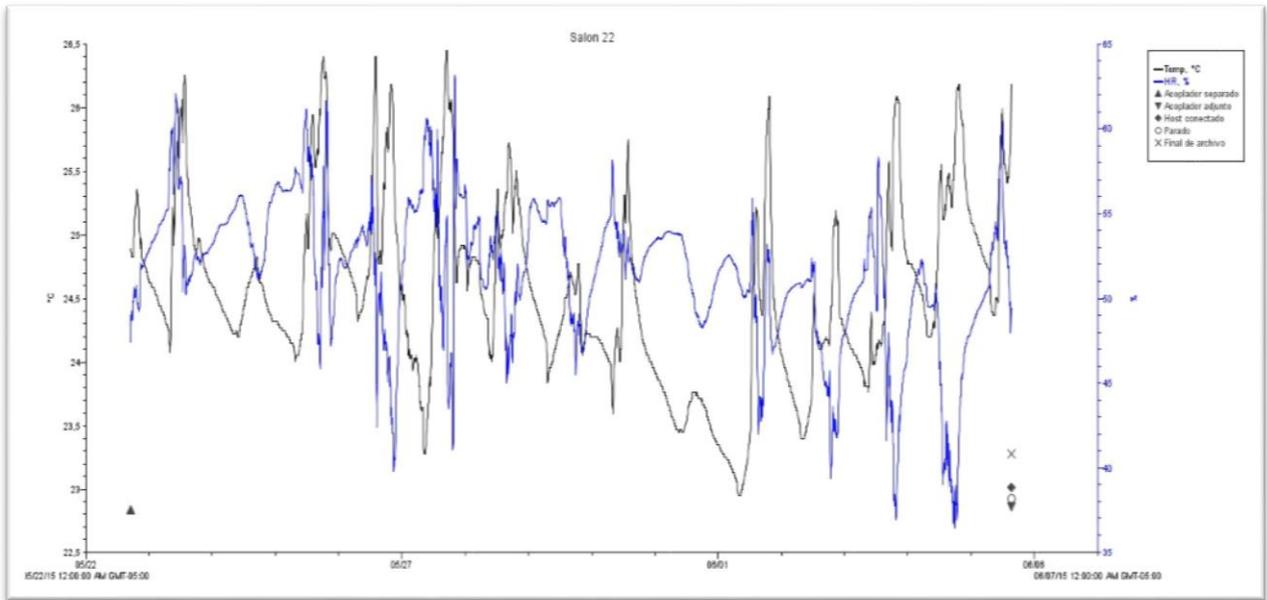
Las figuras que continúan, nos muestran las variables internas, por cada salón en el periodo comprendido en el mes de mayo a junio.



**Figura 4.6. Graficas de las variables de temperatura y humedad al interior del salón 20 (techo extensivo, 10 cm).**



**Figura 4.7. Graficas de las variables de temperatura y humedad al interior del salón 21 (techo intensivo, 15 cm).**



**Figura 4.8. Graficas de las variables de temperatura y humedad al interior del salón 22 (techo intensivo, 25 cm).**

#### 4.1.3.2. Mes de Junio - Julio

En la tabla 4.7 se muestra las variaciones de temperatura, y en la tabla 4.8 las variaciones de humedad relativa, en el periodo comprendido en el mes de junio a julio.

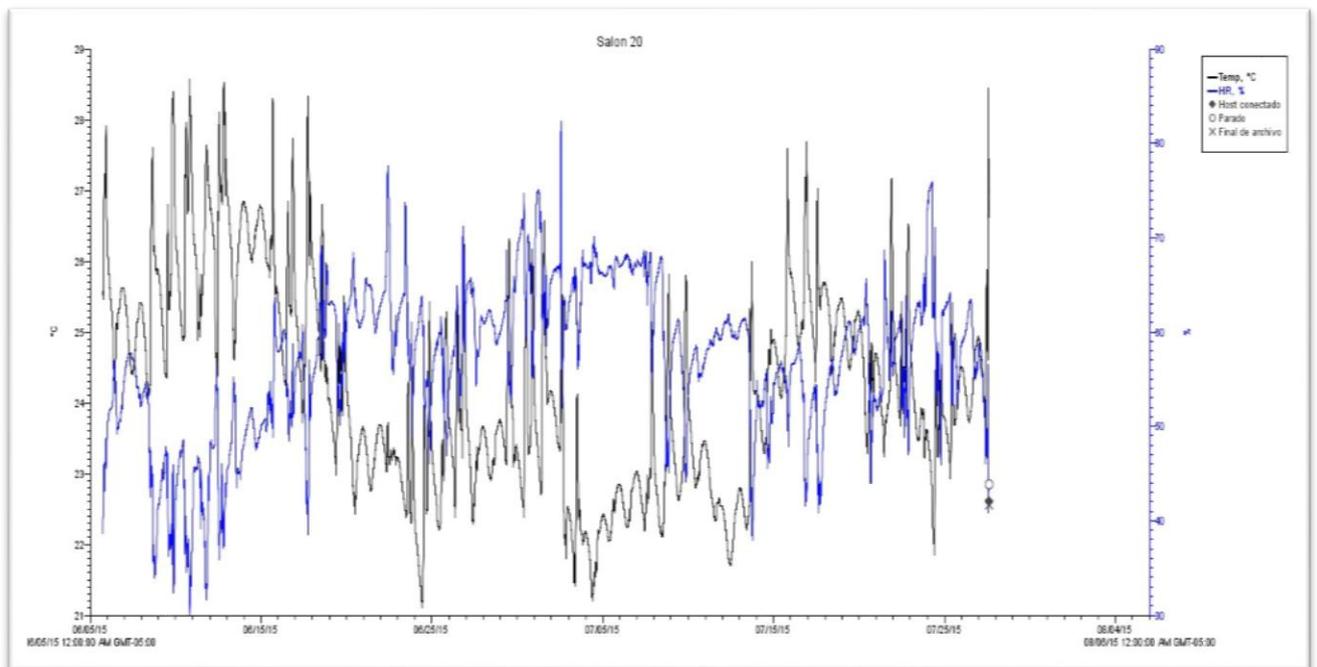
**Tabla 4.7. Registros de la temperatura en el interior de las aulas, en el periodo de junio y julio.**

Salón	Tipo de Techo	Espesor (cm)	Núm. de muestras	Temp máx. °C	Hra y fecha de la muestra máx.	Temp mín. °C	Hra y fecha de la muestra min	Temp prom °C	Desv estándar ( $\sigma$ )
20	Extensivo	15	14927	28.574	10 de junio 07:50 pm	21.107	27 de junio; 10:05 am	21.124	1.45
21	Intensivo	20	14927	27.554	27 de julio; 01:15 pm	20.936	04 de julio; 09:50 am	23.961	1.293
22	Intensivo	25	14927	27.382	13 de junio 01:40 pm	21.366	04 de julio; 07:55 am	23.753	1.223

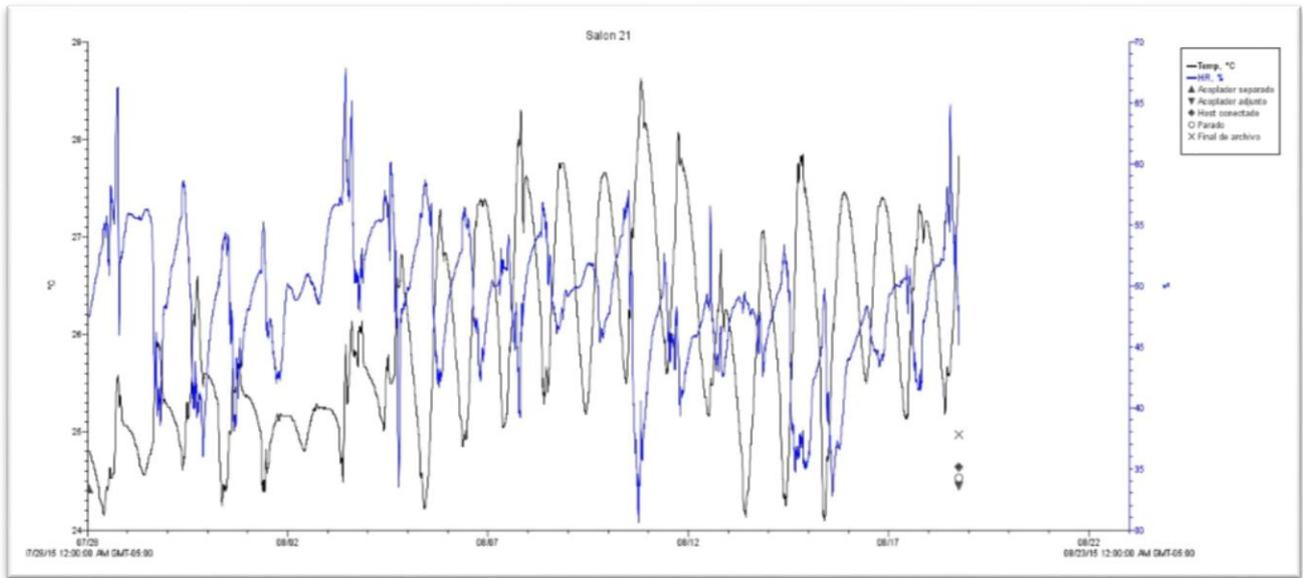
**Tabla 4.8 Registros de la humedad relativa en el interior de las aulas, en el periodo de junio y julio.**

Salón	Tipo de Techo	Espesor (cm)	Núm. de muestras	Hum máx. %	Hra y fecha de la muestra máx.	Hum min %	Hra y fecha de la muestra min.	Hum prom %	Desv estándar ( $\sigma$ )
20	Extensivo	15	14927	82.367	02 de julio; 13:35 pm	30.106	10 de junio; 08:10 pm	57.175	7.846
21	Intensivo	20	14927	71.42	01 de julio; 13:35 pm	34.655	11 de junio; 07:35 pm	58.155	6.085
22	Intensivo	25	14927	72.959	20 de junio; 09:40 am	33.362	09 de junio; 08:35 pm	57.543	6.048

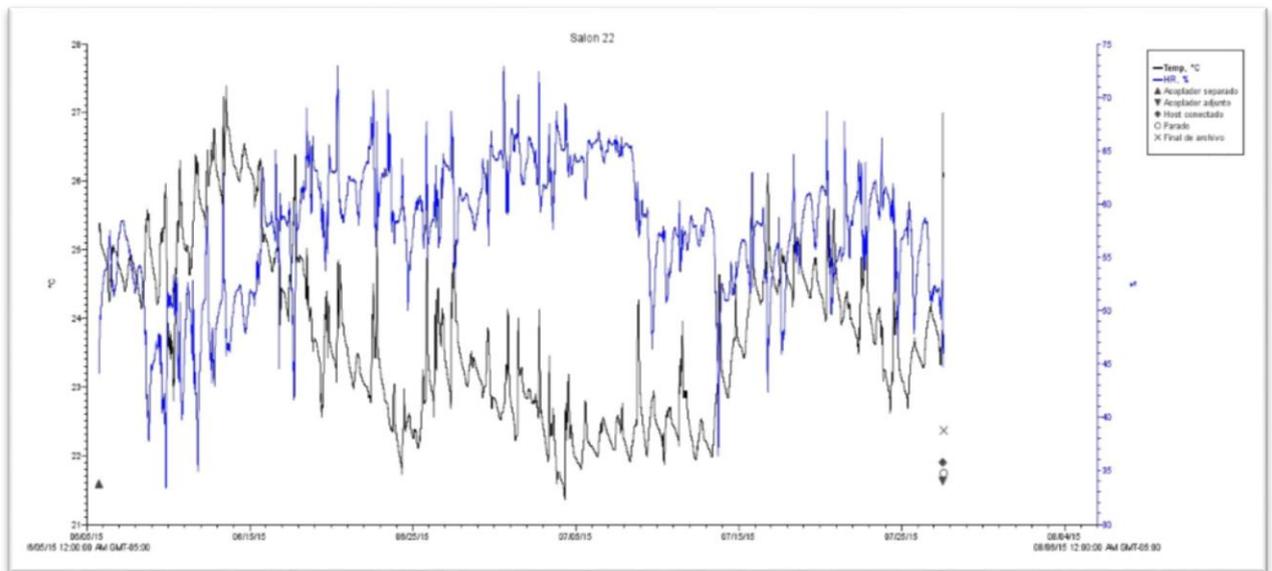
Las figuras siguientes nos muestran las variables internas, por cada salón en el periodo comprendido en el mes de junio a julio.



**Figura 4.9. Graficas de las variables de temperatura y humedad al interior del salón 20 (techo extensivo, 10 cm).**



**Figura 4.10. Graficas de las variables de temperatura y humedad al interior del salón 21 (techo intensivo, 15 cm).**



**Figura 4.11 Graficas de las variables de temperatura y humedad al interior del salón 22 (techo intensivo, 25 cm)**

#### **4.1.3.3. Mes de Julio – Agosto.**

En la tabla 4.9 se muestra las variaciones de temperatura, y en la tabla 4.10 las variaciones de humedad relativa, en el periodo comprendido en el mes de julio y agosto.

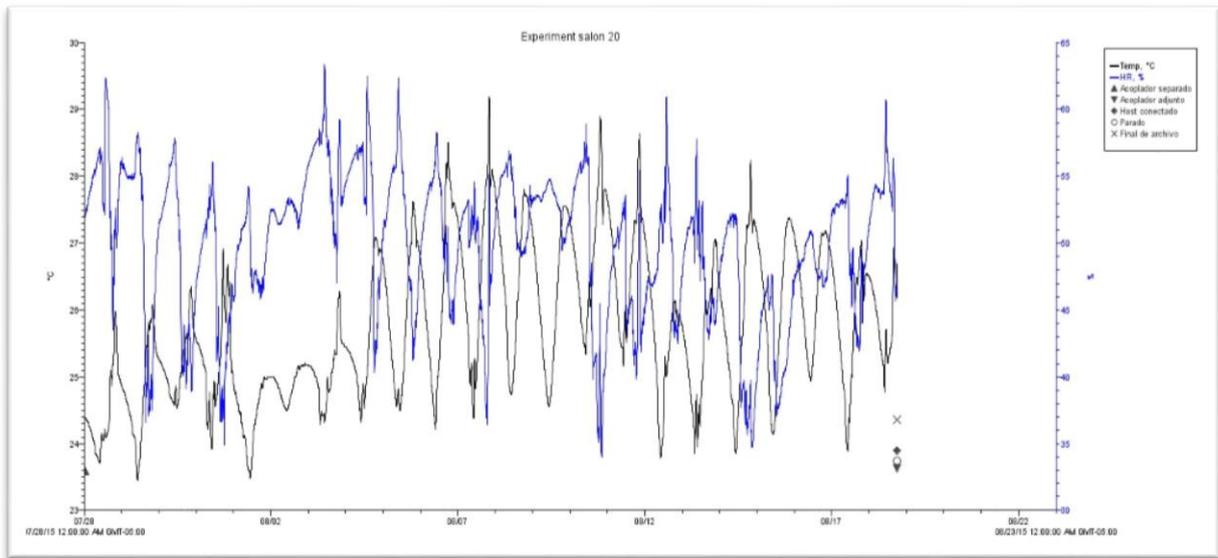
**Tabla 4.9. Registros de la temperatura en el interior de las aulas, en el periodo de julio y agosto.**

Salón	Tipo de Techo	Espesor (cm)	Núm. de muestras	Temp máx. °C	Hra y fecha de la muestra máx.	Temp min. °C	Hra y fecha de la muestra min.	Temp prom °C	Desv estándar ( $\sigma$ )
20	Extensivo	15	6.255	29.19	07 de agosto; 08:15 pm	23.448	29 de julio; 10:20 am	25.731	1.109
21	Intensivo	20	6.255	28.617	10 de agosto; 07:20 pm	24.098	15 de agosto; 09:35 am	25.956	0.993
22	Intensivo	25	6.255	29.414	10 de agosto; 07:10 pm	24.098	28 de julio; 07:25 am	26.138	1.033

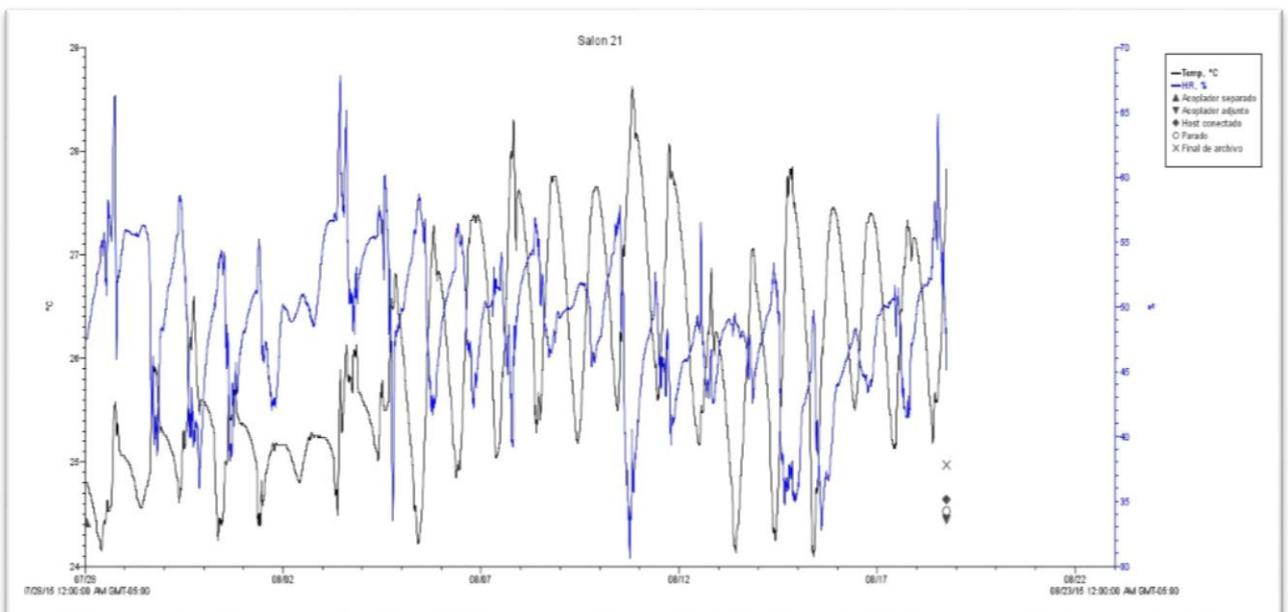
**Tabla 4.10. Registros de la humedad relativa en el interior de las aulas, en el periodo de julio y agosto.**

Salón	Tipo de Techo	Espesor (cm)	Núm. de muestras	Hum máx. %	Hra y fecha de la muestra máx.	Hum min. %	Hra y fecha de la muestra min	Hum prom %	Desv estándar ( $\sigma$ )
20	Extensivo	15	6.255	63.372	03 de agosto; 10:35 am	33.995	10 de agosto; 08:15 pm	50.011	5.341
21	Intensivo	20	6.255	67.81	03 de agosto; 10:45 am	30.619	10 de agosto; 06:05 pm	48.751	5.442
22	Intensivo	25	6.255	63.708	03 de agosto; 06:05 pm	31.405	10 de agosto; 06:20 pm	48.141	5.294

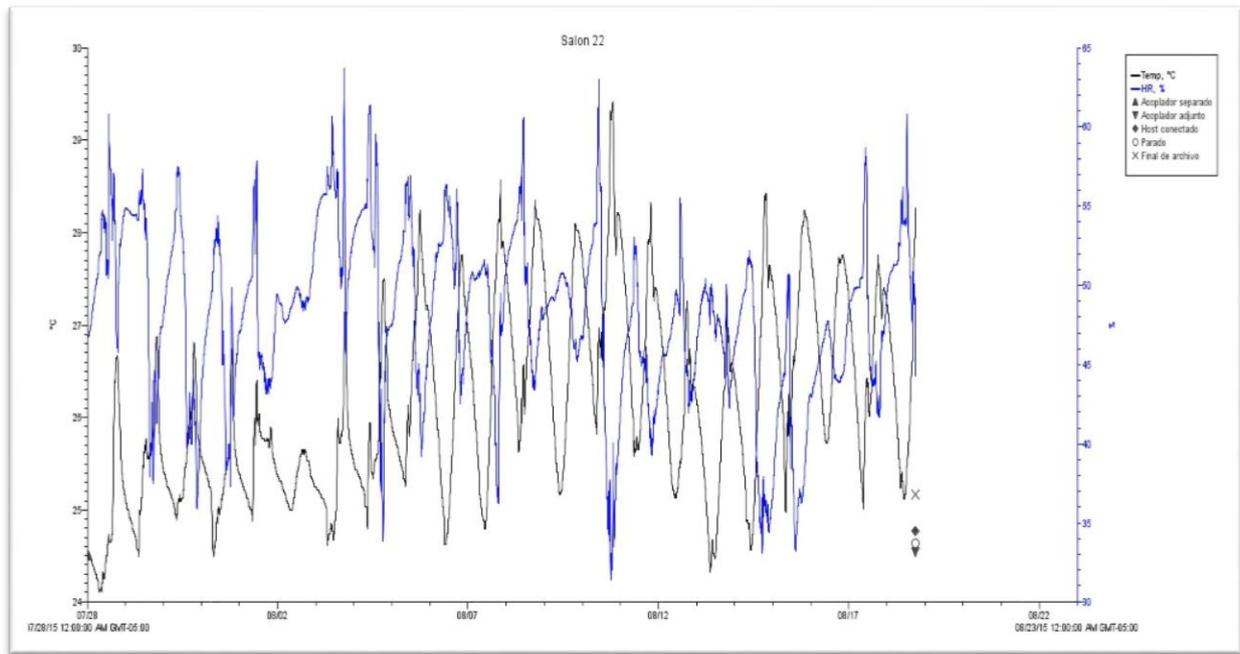
A continuación las figuras nos muestran las variables internas, por cada salón en el periodo comprendido en el mes de julio a agosto.



**Figura 4.12. Graficas de las variables de temperatura y humedad al interior del salón 20 (techo extensivo, 10 cm).**



**Figura 4.13. Graficas de las variables de temperatura y humedad al interior del salón 21 (techo intensivo, 15 cm).**



**Figura 4.14. Graficas de las variables de temperatura y humedad al interior del salón 22 (techo intensivo, 25 cm)**

#### 4.1.3.4. Mes de Agosto - Septiembre

En la tabla 4.11 se muestra las variaciones de temperatura, y en la tabla 4.12 las variaciones de humedad relativa, en el periodo comprendido en el mes de agosto y septiembre.

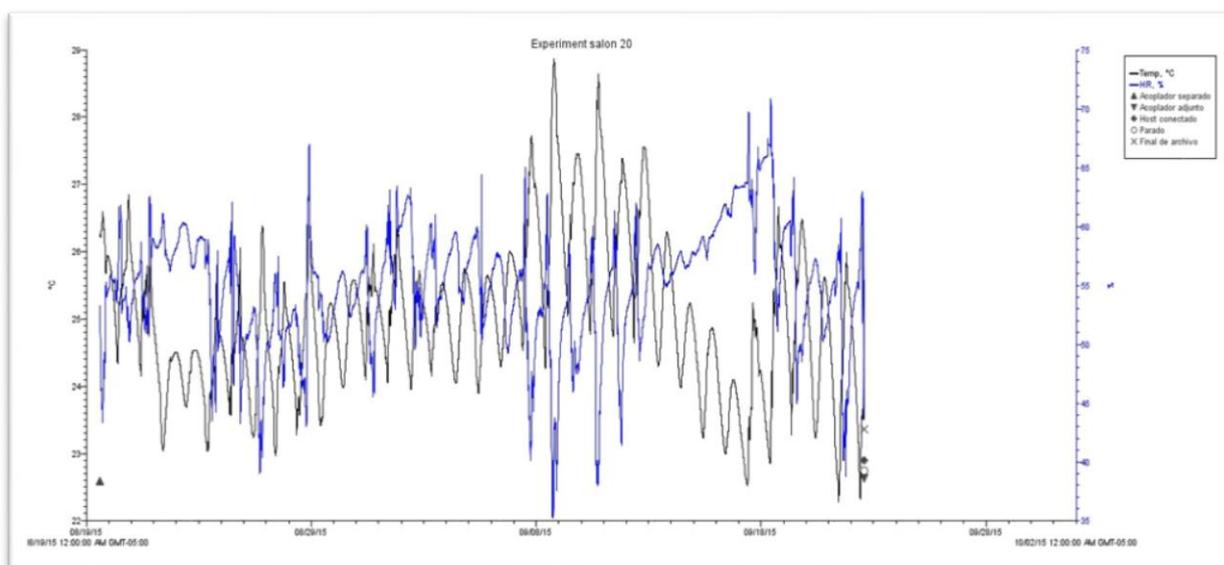
**Tabla 4.11. Registros de la temperatura en el interior de las aulas, en el periodo agosto y septiembre.**

Salón	Tipo de Techo	Espesor (cm)	Núm. de muestras	Temp máx. °C	Hra y fecha de la muestra máx.	Temp min. °C	Hra y fecha de la muestra min	Temp prom °C	Desv estándar (σ)
20	Extensivo	15	9789	28.864	08 de septiembre; 06:50 pm	22.27 4	21 de septiembre; 10:25 am	25.019	1.104
21	Intensivo	20	9789	28.023	19 de agosto; 05:55 pm	22.8	26 de agosto; 10:10 am	25.268	1.016
22	Intensivo	25	9789	29.54	08 de septiembre; 06:45 pm	22.65 7	22 de septiembre; 08:40 am	25.302	1.2

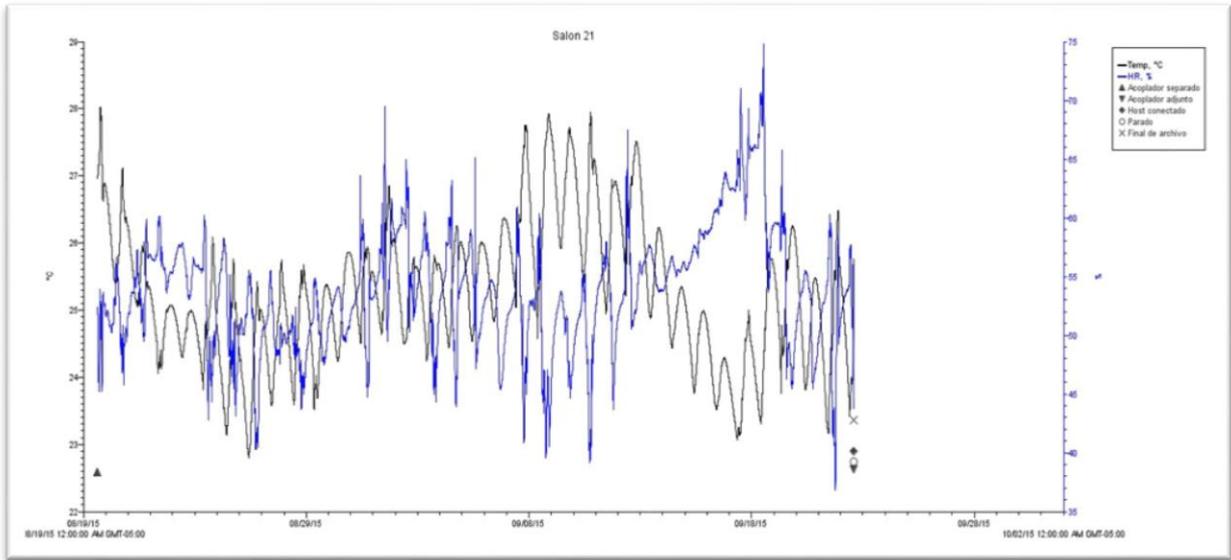
**Tabla 4.12. Registros de la humedad relativa en el interior de las aulas, en el periodo de agosto y septiembre.**

Salón	Tipo de Techo	Espesor (cm)	Núm. de muestras	Hum máx. %	Hra y fecha de la muestra máx.	Hum min %	Hra y fecha de la muestra min	Hum prom %	Desv estándar ( $\sigma$ )
20	Extensivo	15	9789	70.864	18 de septiembre; 10:35 am	35.218	08 de septiembre; 06:30 pm	54.939	4.995
21	Intensivo	20	9789	74.8	18 de septiembre; 12:55 pm	36.835	21 de septiembre; 06:30 pm	53.77	5.026
22	Intensivo	25	9789	72.85	17 de septiembre; 12:20 pm	36.225	08 de septiembre; 03:50 pm	53.322	5.034

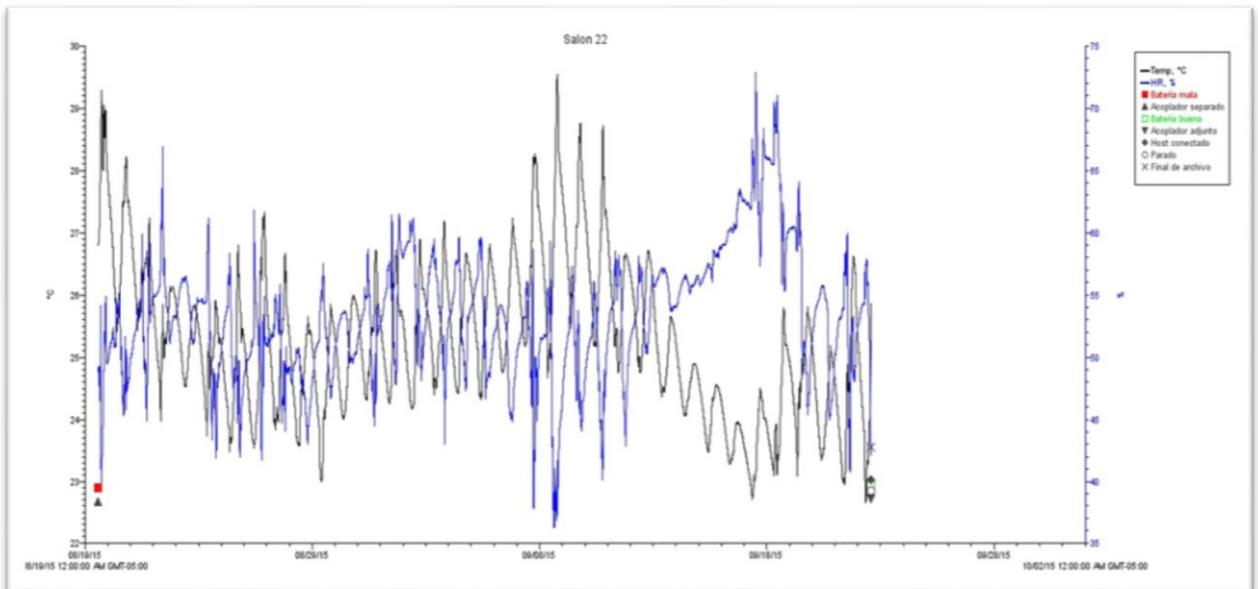
Las figuras siguientes nos muestran las variables internas, por cada salón en el periodo comprendido en el mes de agosto a septiembre.



**Figura 4.15 Graficas de las variables de temperatura y humedad al interior del salón 20 (techo extensivo, 10 cm).**



**Figura 4.16. Graficas de las variables de temperatura y humedad al interior del salón 21 (techo intensivo, 15 cm**



**Figura 4.17. Graficas de las variables de temperatura y humedad al interior del salón 22 (techo intensivo, 25 cm).**

#### 4.1.3.5. Mes de Septiembre - Octubre

En la tabla 4.13 se muestra las variaciones de temperatura, y en la tabla 4.14 las variaciones de humedad relativa, en el periodo comprendido en el mes de septiembre y octubre.

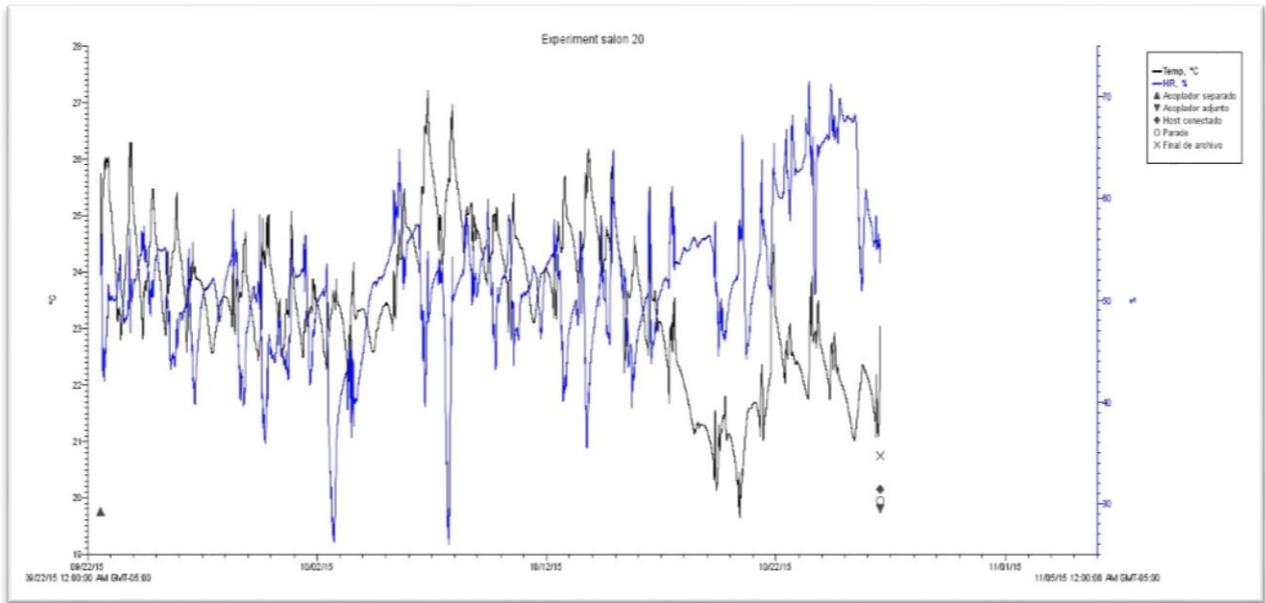
**Tabla 4.13. Registros de la temperatura en el interior de las aulas, en el periodo septiembre y octubre.**

Salón	Tipo de Techo	Espesor (cm)	Núm. de muestras	Temp máx. °C	Hra y fecha de la muestra máx.	Temp min. °C	Hra y fecha de la muestra min	Temp prom °C	Desv estándar ( $\sigma$ )
20	Extensivo	15	9780	27.21	06 de octubre; 08:10 pm	19.651	20 de octubre; 10:15 am	23.444	1.303
21	Intensivo	20	9780	25.89	06 de octubre; 09:10 pm	20.341	20 de octubre; 09:35 am	23.502	1.205
22	Intensivo	25	9780	27.014	06 de octubre; 06:20 pm	20.126	20 de octubre; 09:10 am	23.539	1.331

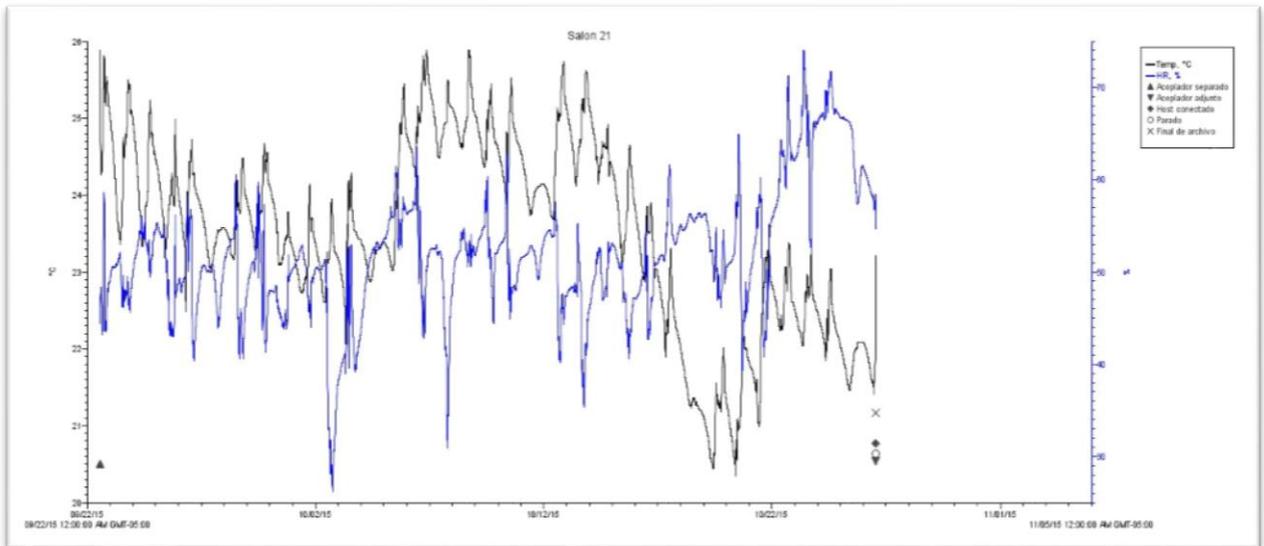
**Tabla 4.14. Registros de la humedad relativa en el interior de las aulas, en el periodo de septiembre y octubre.**

Salón	Tipo de Techo	Espesor (cm)	Núm. de muestras	Hum máx. %	Hra y fecha de la muestra máx.	Hum min %	Hra y fecha de la muestra min	Hum prom %	Desv estándar ( $\sigma$ )
20	Extensivo	15	9780	71.522	23 de octubre; 10:30 am	25.964	07 de octubre; 06:00 pm	52.863	6.957
21	Intensivo	20	9780	74.04	23 de octubre; 09:15 am	26.184	02 de octubre; 06:25 pm	51.988	6.75
22	Intensivo	25	9780	71.742	23 de octubre; 11:45 am	26.078	02 de octubre; 06:25 pm	51.065	7.026

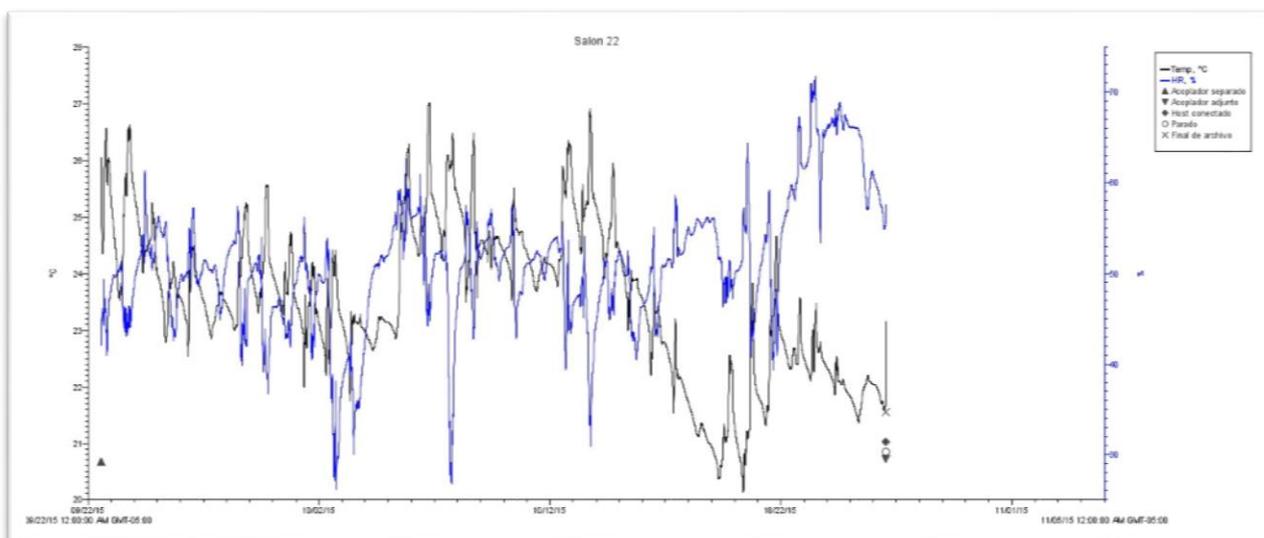
Las figuras que continúan nos muestran las variables internas, por cada salón en el periodo comprendido en el mes de septiembre a octubre.



**Figura 4.18. Graficas de las variables de temperatura y humedad al interior del salón 20 (techo extensivo, 10 cm)**



**Figura 4.19. Graficas de las variables de temperatura y humedad al interior del salón 21 (techo intensivo, 15 cm).**



**Figura 4.20. Graficas de las variables de temperatura y humedad al interior del salón 22 (techo intensivo, 25 cm).**

En la tabla 4.15 se muestra como vario la temperatura y la humedad relativa al interior del salón 20, se presentó la mayor temperatura en el mes de julio-agosto y la mínima en los meses de enero a marzo y la humedad relativa máxima en mayo-junio y la mínima en enero-marzo.

**Tabla 4.15. Variaciones de los parámetros internos, en el salón 20.**

<b>Salón 20 techo extensivo (10 cm)</b>	<b>Temp máx. °C</b>	<b>Temp min. °C</b>	<b>Hum máx. %</b>	<b>Hum min %</b>
Enero - Marzo	29.19	13.93	51.803	24.272
Marzo - Mayo				
Mayo - Junio	27.955	23.021	63.721	31.09
Junio - Julio	28.574	21.107	82.367	30.106
Julio - Agosto	29.19	23.448	63.372	33.995
Agosto - Septiembre	28.8664	22.274	70.864	35.218
Septiembre - Octubre	27.21	19.651	71.522	25.964

En la tabla 4.16 se muestra como vario la temperatura y la humedad relativa al interior del salón 21, se presentó la mayor temperatura en el mes de julio-agosto y la mínima en los meses de enero a marzo, y la humedad relativa máxima y mínima en los meses de enero a marzo.

**Tabla 4.16. Variaciones de los parámetros internos, en el salón 21.**

<b>Salón 21 techo extensivo (15 cm)</b>	<b>Temp máx. °C</b>	<b>Temp mín. °C</b>	<b>Hum máx. %</b>	<b>Hum mín %</b>
Enero - Marzo	25.137	15.461	80.857	18.858
Marzo - Mayo	28.122	21.079	65.736	28.025
Mayo - Junio	27.161	23.088	65.12	36.059
Junio - Julio	27.554	20.936	71.42	34.655
Julio - Agosto	28.617	24.098	67.81	30.619
Agosto - Septiembre	28.023	22.8	74.8	36.835
Septiembre - Octubre	25.89	20.341	74.04	26.184

En la tabla 4.17 se muestra como vario la temperatura y la humedad relativa al interior del salón 22, se presentó la mayor temperatura en el mes de julio-agosto y la mínima en los meses de enero a marzo, y la humedad relativa máxima y mínima en los meses de enero a marzo.

**Tabla 4.17. Variaciones de los parámetros internos, en el salón 22.**

<b>Salón 22 techo extensivo (25 cm)</b>	<b>Temp máx. °C</b>	<b>Temp mín. °C</b>	<b>Hum máx. %</b>	<b>Hum mín %</b>
Enero - Marzo	25.793	15.27	77.81	19,549
Marzo - Mayo	29.19	20.341	66.173	24
Mayo - Junio	26.451	22.944	63.161	36.447
Junio - Julio	27.382	21.366	72.959	33.362
Julio - Agosto	29.414	24.098	63.708	31.405
Agosto - Septiembre	29.54	22.657	72.85	36.225
Septiembre - Octubre	27.014	20.126	71.742	26.078

## 4.2 Resumen anual

En las siguientes tablas 4.18, 4.19 y 4.20 nos muestran las temperaturas promedios, las máximas promedios y las mínimas promedio por mes en todo el año 2015, en las gráficas 4.1, 4.2 y 4.3 nos muestran las variaciones de promedios, máximas y mínimas en el transcurso del año de estudio.

**Tabla 4.18. Temperatura promedio anual.**

Meses	Temperaturas promedio °C		
	Salón 20	Salón 21	Salón 22
Enero	20.72	20.91	20.52
Febrero	20.51	20.75	20.27
Marzo	21.13	21.25	21.02

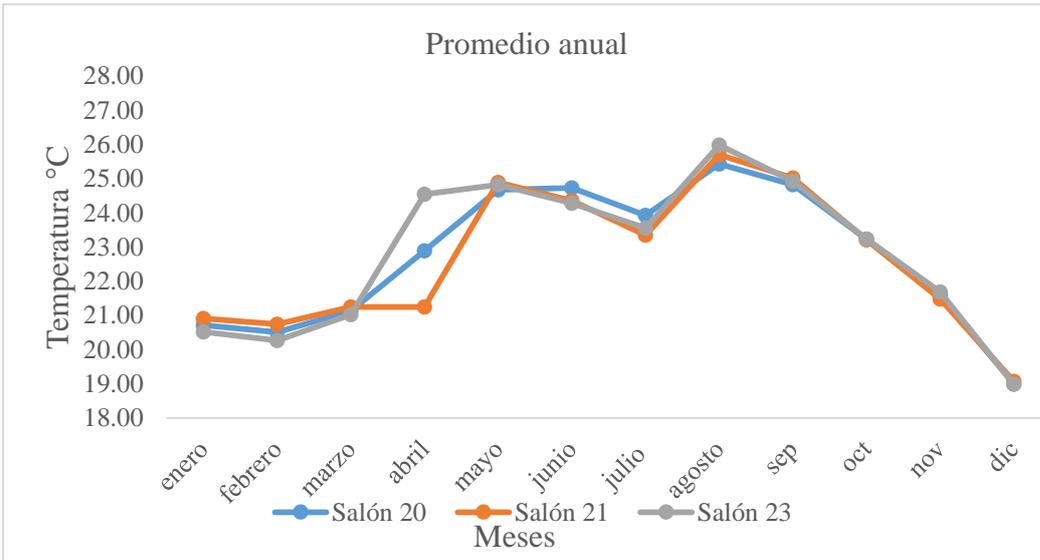
Abril	22.89	21.25	24.54
Mayo	24.67	24.89	24.82
Junio	24.73	24.36	24.28
Julio	23.93	23.35	23.56
Agosto	25.43	25.70	25.99
Septiembre	24.83	25.02	24.93
Octubre	23.23	23.21	23.23
Noviembre	21.59	21.48	21.69
Diciembre	19.00	19.08	18.99

**Tabla 4.19. Temperaturas máximas promedios anual.**

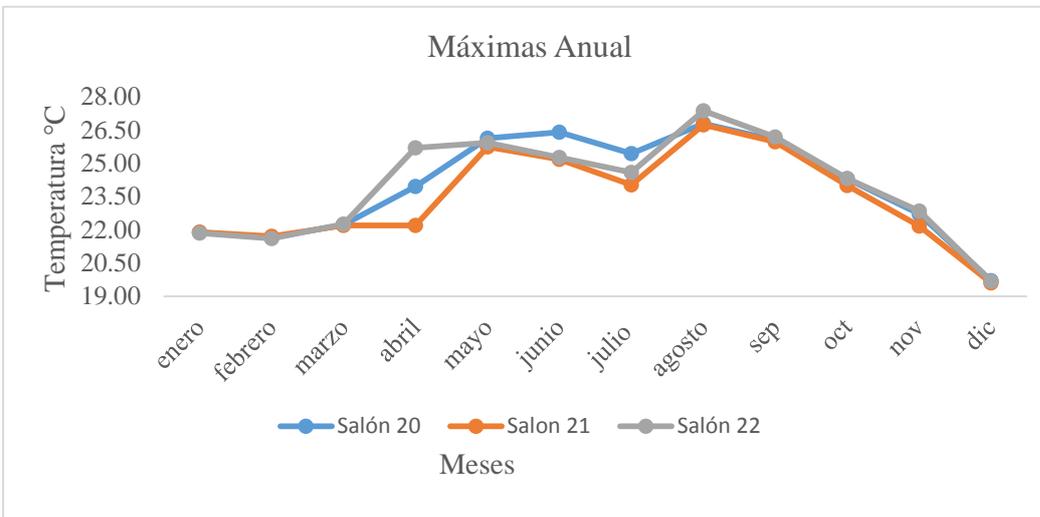
Meses	Temperaturas Máximas °C		
	Salón 20	Salón 21	Salón 22
Enero	21.87	21.89	21.85
Febrero	21.65	21.70	21.60
Marzo	22.23	22.20	22.25
Abril	23.94	22.20	25.69
Mayo	26.12	25.74	25.92
Junio	26.39	25.17	25.26
Julio	25.44	24.02	24.58
Agosto	26.79	26.73	27.36
Septiembre	26.04	25.97	26.17
Octubre	24.30	24.00	24.31
Noviembre	22.71	22.16	22.85
Diciembre	19.71	19.60	19.67

**Tabla 4.20. Temperaturas mínimas promedios anual.**

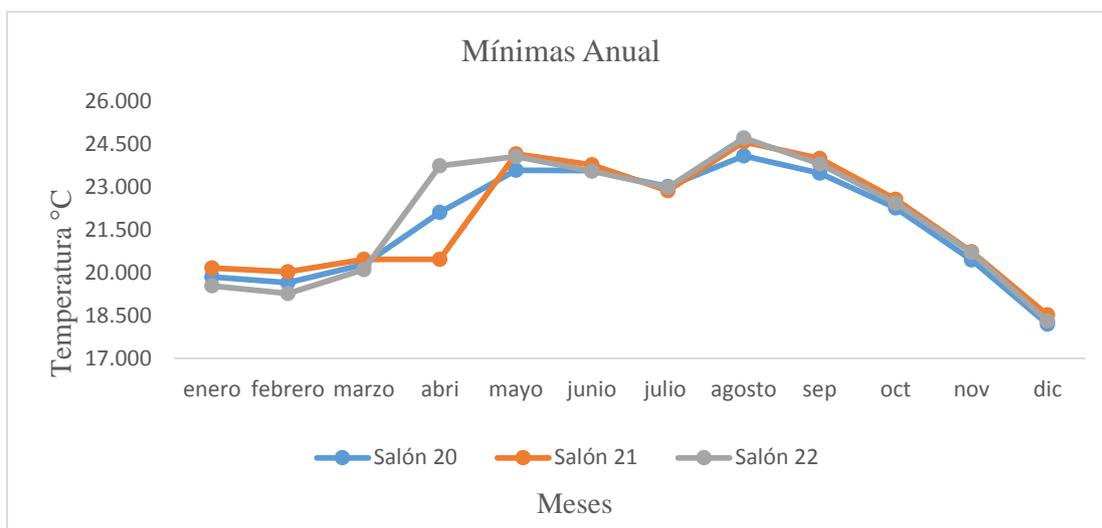
Meses	Temperaturas Mínimas °C		
	Salón 20	Salón 21	Salón 22
Enero	19.857	20.170	19.544
Febrero	19.658	20.043	19.273
Marzo	20.300	20.479	20.120
Abril	22.114	20.479	23.750
Mayo	23.602	24.163	24.078
Junio	23.581	23.787	23.562
Julio	23.026	22.878	22.995
Agosto	24.104	24.592	24.728
Septiembre	23.498	24.007	23.816
Octubre	22.281	22.583	22.440
Noviembre	20.455	20.743	20.718
Diciembre	18.198	18.531	18.317



**Figura 4.21. Variaciones de temperatura promedio.**



**Figura 4.22. Variaciones de temperatura máximas promedio.**



**Figura 4.23. Variaciones de temperatura mínimas promedio.**

### 4.3 Comparativa

Se realizó una comparativa anual, de las temperaturas y humedades máximas y mínimas, de los techos verdes vs el techo tradicional, y también se puso como referencia el monitoreo de las variables externas, tanto de temperatura, como de humedad considerando las máximas y las mínimas, estas variables las acotamos al rango de confort según la norma Asrhae.

En las siguientes tablas 4.21 y 4.22 nos muestra la comparativa del año de las temperaturas máximas y mínimas comparando el techo tradicional contra los techos verdes, se toma como referencia los valores exteriores de temperaturas máximas y mínimas

**Tabla 4.21. Temperaturas máximas anuales.**

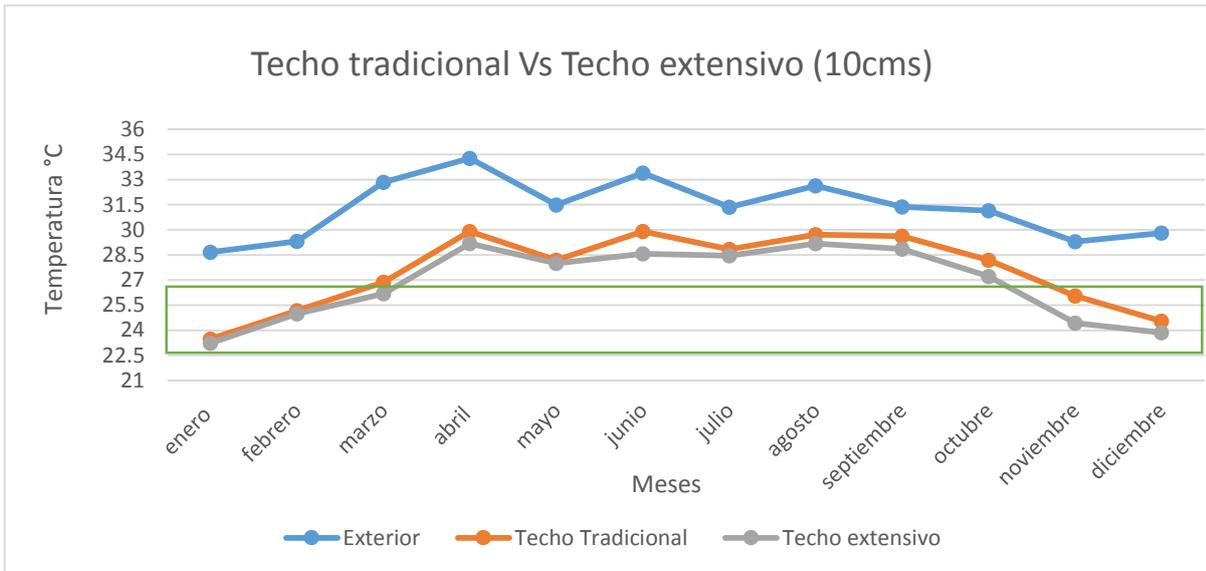
Valores de Temperatura Máximas.					
Mes	Exterior	Salón 19	Salón 20	Salón 21	Salón 22
Enero	28.667	23.486	23.236	22.944	22.393
Febrero	29.315	25.176	24.985	24.508	25.137
Marzo	32.846	26.868	26.178	25.137	25.793
Abril	34.281	29.899	29.19	28.122	29.19
Mayo	31.484	28.186	27.995	27.949	27.604
Junio	33.39	29.899	28.574	27.161	27.382
Julio	31.357	28.841	28.45	27.554	26.989
Agosto	32.639	29.715	29.19	28.617	29.414

Septiembre	31.382	29.617	28.866	27.949	29.54
Octubre	31.153	28.196	27.21	25.89	27.014
Noviembre	29.29	26.061	24.436	24.026	24.629
Diciembre	29.815	24.557	23.857	23.136	24.436

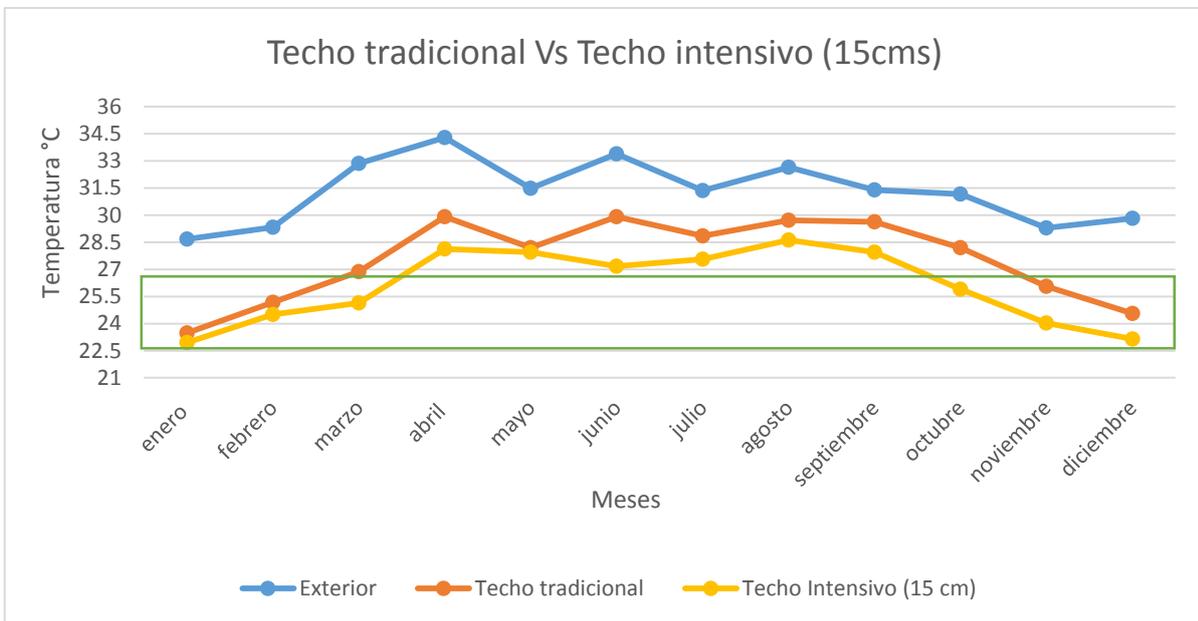
**Tabla 4.22. Temperaturas mínimas anuales.**

Valores de Temperatura Mínimas.					
Mes	Exterior	Salón 19	Salón 20	Salón 21	Salón 22
Enero	5.821	17.654	17.558	19.627	18.723
Febrero	4.74	17.012	16.153	17.558	16.701
Marzo	1.317	14.986	14.989	15.461	15.27
Abril	10.026	22.834	22.8	22.321	22.034
Mayo	13.93	22.984	23.045	22.393	22.298
Junio	12.703	21.876	21.107	21.604	21.724
Julio	13.21	21.184	21.203	20.936	21.366
Agosto	13.738	22.369	22.968	22.8	22.992
Septiembre	14.098	21.413	22.274	22.489	22.537
Octubre	8.95	18.604	19.651	20.341	20.126
Noviembre	4.194	18.129	19.08	19.27	19.365
Diciembre	7.217	14.505	16.153	16.606	16.272

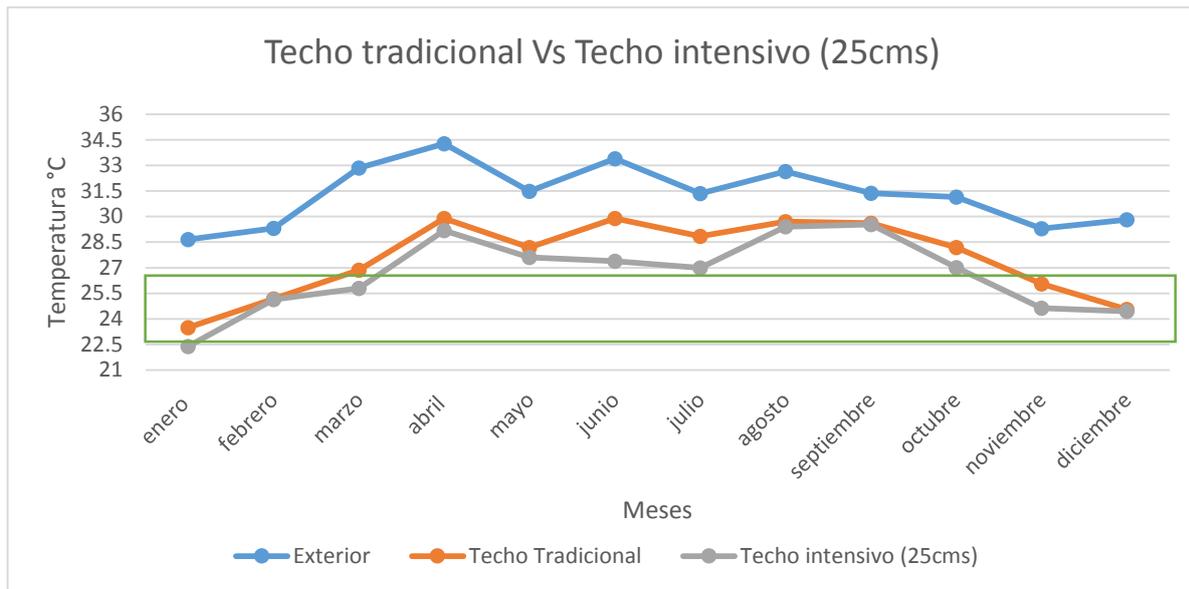
En las gráficas 4.24, 4.25 y 4.26 nos muestra la comparativa de las temperaturas máximas del techo tradicional vs los techos verdes, acotándola a la zona de confort de la norma ASRHAE.



**Figura 4.24. Comparativa techo tradicional vs techo extensivo.**

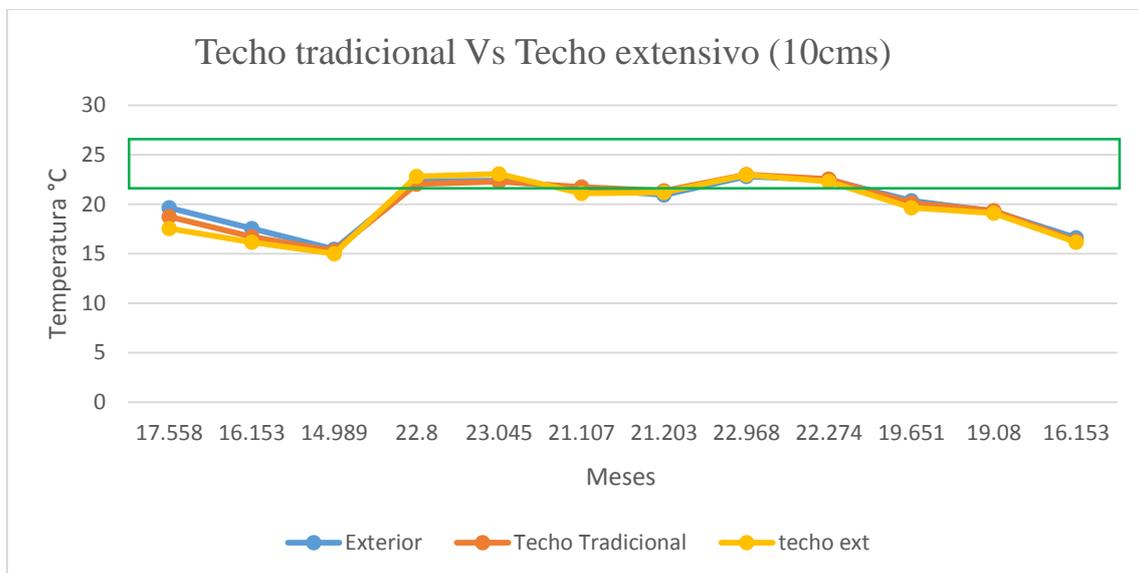


**Figura 4.25. Comparativa techo tradicional vs techo intensivo 15 cm.**

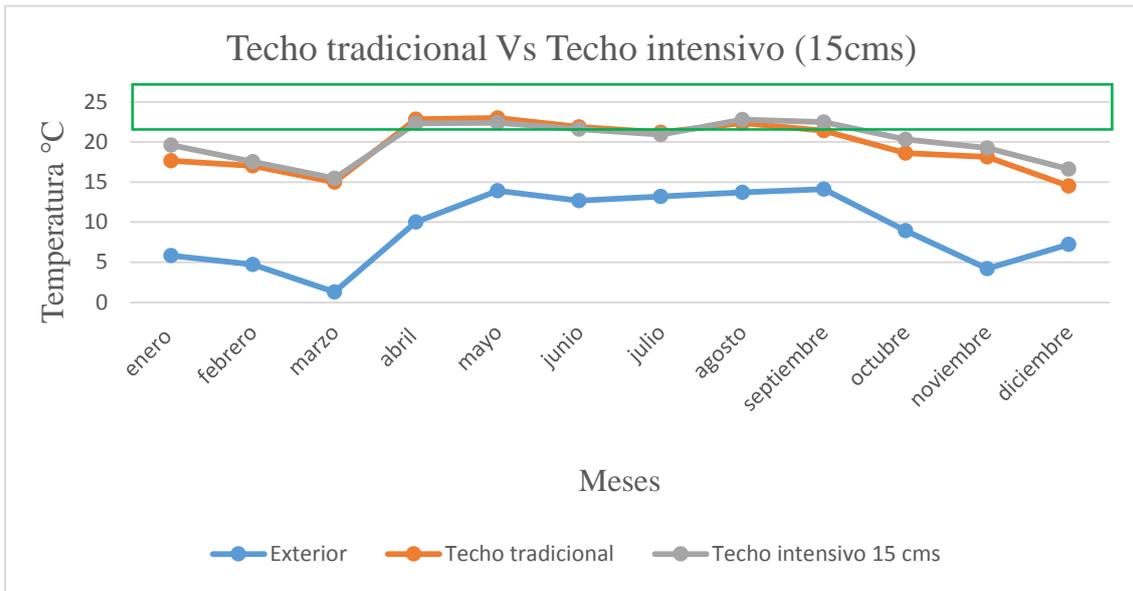


**Figura 4.26. Comparativa techo tradicional vs techo intensivo 25 cm.**

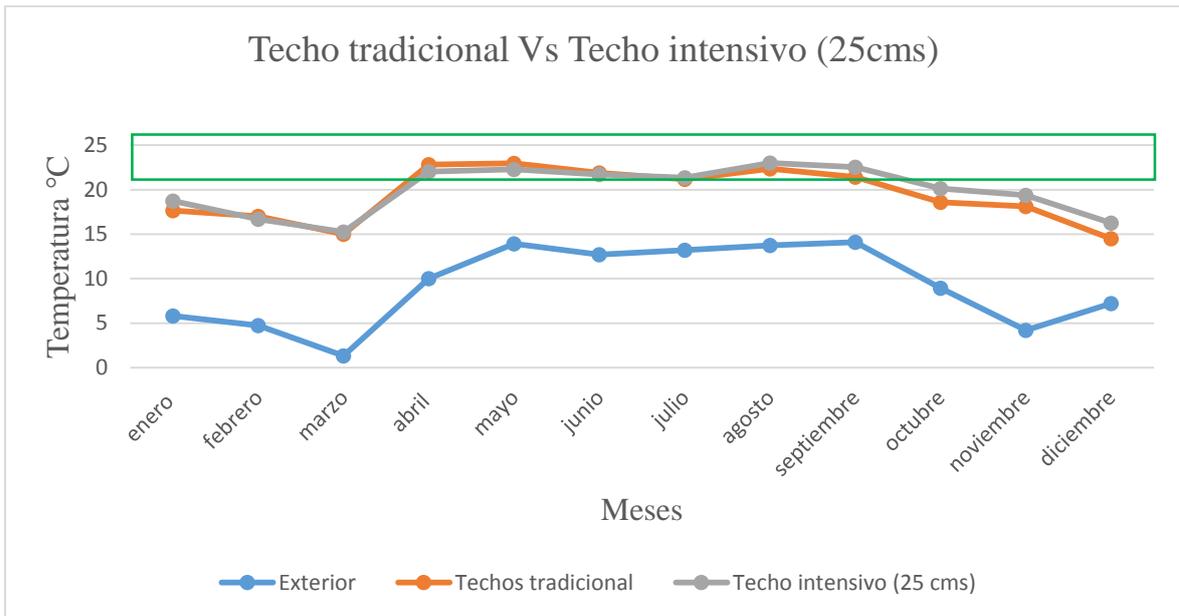
En las gráficas 4.27, 4.28 y 4.29 nos muestra la comparativa de las temperaturas mínimas del techo tradicional vs los techos verdes, acotándola a la zona de confort de la norma ASRHAE.



**Figura 4.27. Comparativa techo tradicional vs techo extensivo.**



**Figura 4.28. Comparativa techo tradicional vs techo intensivo 15 cm.**



**Figura 4.29. Comparativa techo tradicional vs techo intensivo 25 cm.**

En las siguientes tablas 4.23 y 4.24 nos muestra la comparativa del año de las humedades máximas y mínimas comparando el techo tradicional contra los techos verdes, se toma como referencia los valores exteriores de humedades.

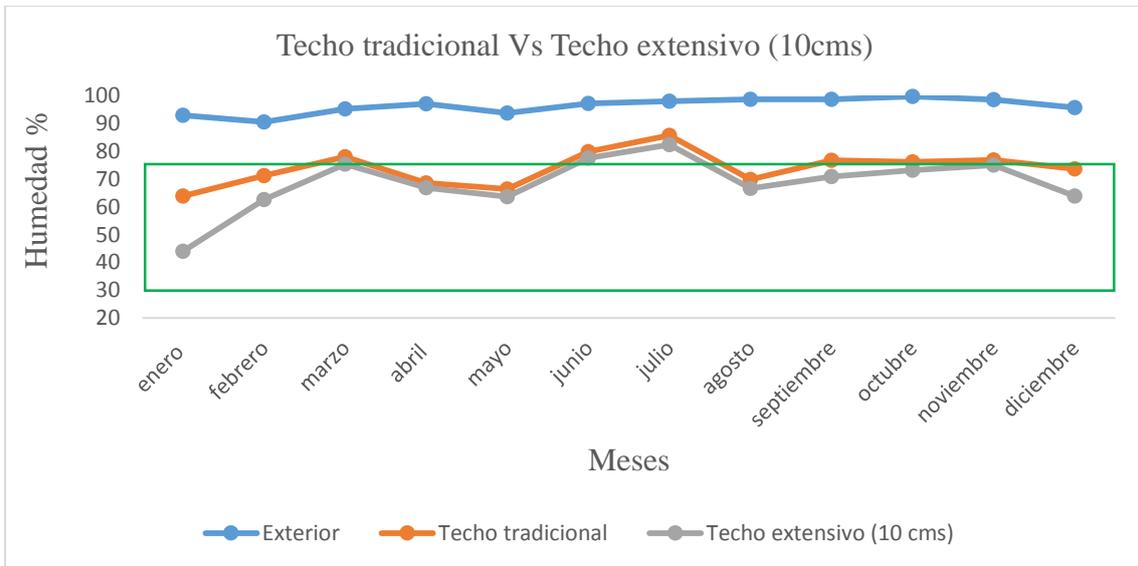
**Tabla 4.23. Humedades máximas anuales.**

Valores de humedades máximas.						
Mes	Exterior	Salón 19	Salón 20	Salón 21	Salón 22	
Enero	92.9	63.876	44.012	59.04	44.612	
Febrero	90.5	71.235	62.602	69.739	60.078	
Marzo	95.2	78.053	75.384	80.857	65.855	
Abril	97.1	68.653	66.901	62.602	65.171	
Mayo	93.7	66.435	63.721	65.736	66.173	
Junio	97.2	79.876	77.589	71.147	72.959	
Julio	98	85.763	82.367	71.42	72.37	
Agosto	98.7	69.867	66.594	67.81	66.901	
Septiembre	98.7	76.8	70.864	74.8	72.85	
Octubre	99.7	76.211	73.184	74.04	73.766	
Noviembre	98.6	76.828	74.988	75.384	69.899	
Diciembre	95.7	73.603	63.897	63.22	73.985	

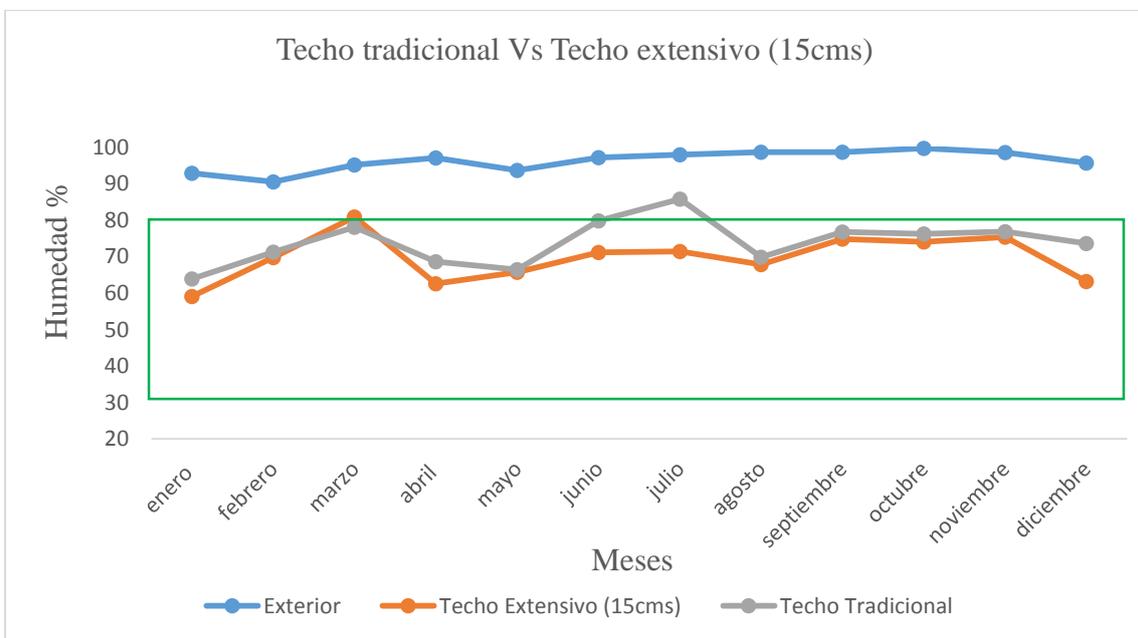
**Tabla 4.24. Humedades mínimas anuales.**

Valores de humedades mínimas.						
Mes	Exterior	Salón 19	Salón 20	Salón 21	Salón 22	
Enero	19.3	28.987	26.818	27.553	27.433	
Febrero	5.3	22.987	25.964	18.858	19.549	
Marzo	4	30.653	26.818	28.647	27.354	
Abril	9.6	28.987	26.184	28.025	23.592	
Mayo	27.6	37.178	36.18	26.818	24.002	
Junio	26.6	26.87	25.964	25.501	25.525	
Julio	19.7	36.987	34.909	35.974	35.876	
Agosto	25.1	34.242	33.995	30.619	31.405	
Septiembre	30.8	40.712	35.219	36.835	36.225	
Octubre	15.5	32.75	25.964	26.184	26.078	
Noviembre	10.1	31.16	26.818	28.611	26.404	
Diciembre	16.1	42.464	33.574	35.217	33.633	

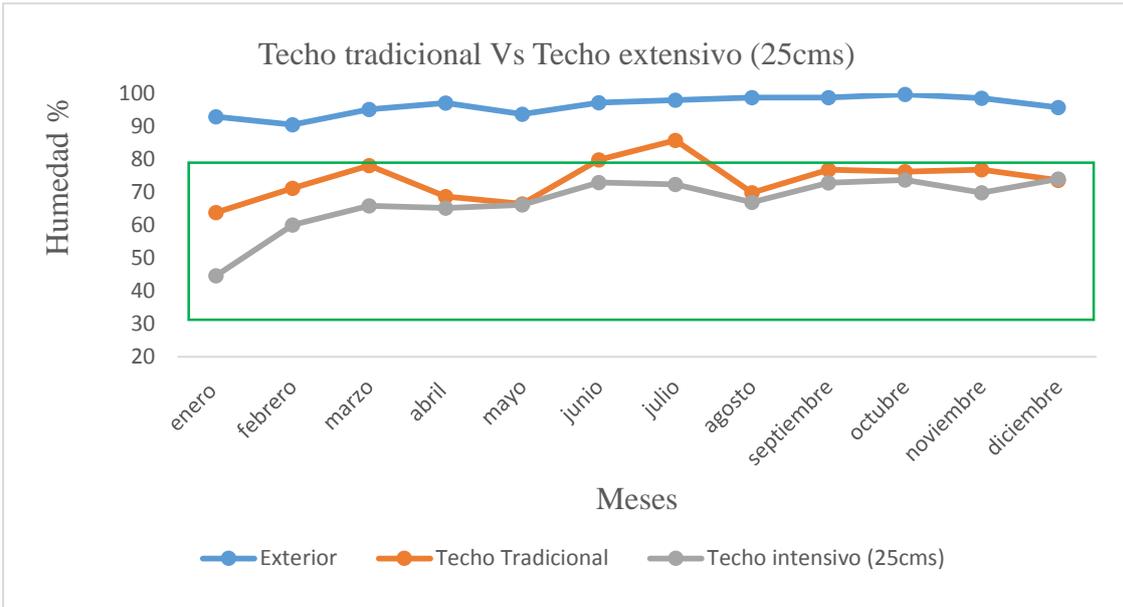
En las gráficas 4.30, 4.31 y 4.32 nos muestra la comparativa de las humedades máximas del techo tradicional vs los techos verdes, acotándola a la zona de confort de la norma ASRHAE.



**Figura 4.30. Comparativa techo tradicional vs techo extensivo.**

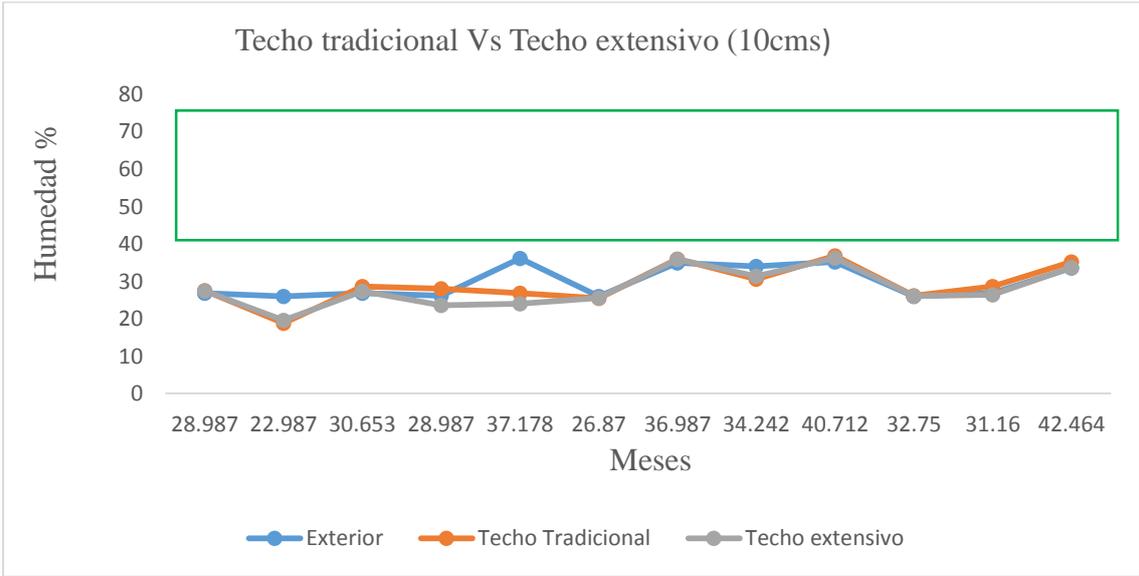


**Figura 4.31. Comparativa techo tradicional vs techo intensivo 15 cm.**

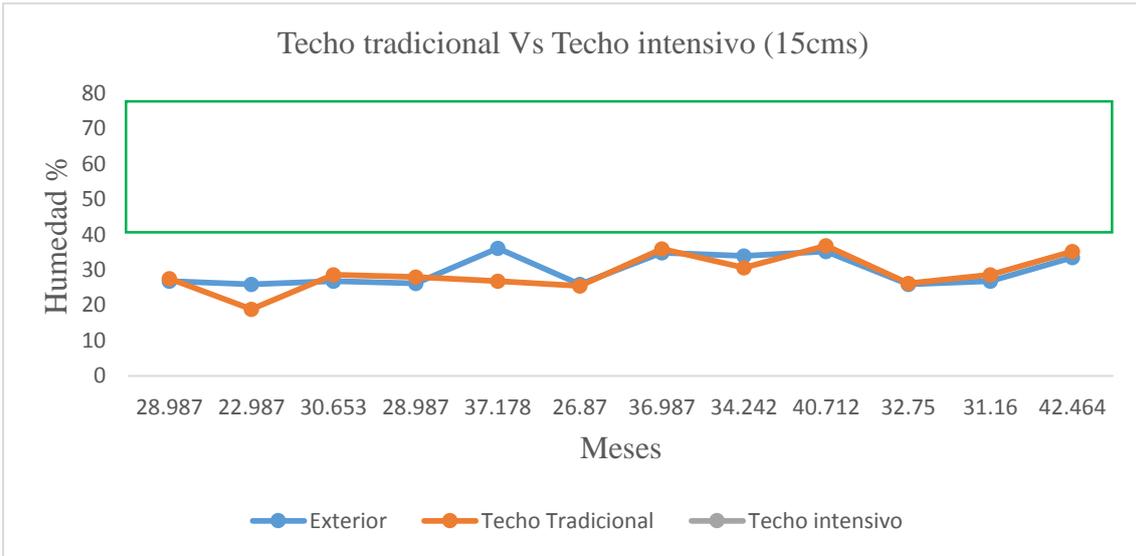


**Figura 4.32. Comparativa techo tradicional vs techo intensivo 25 cm.**

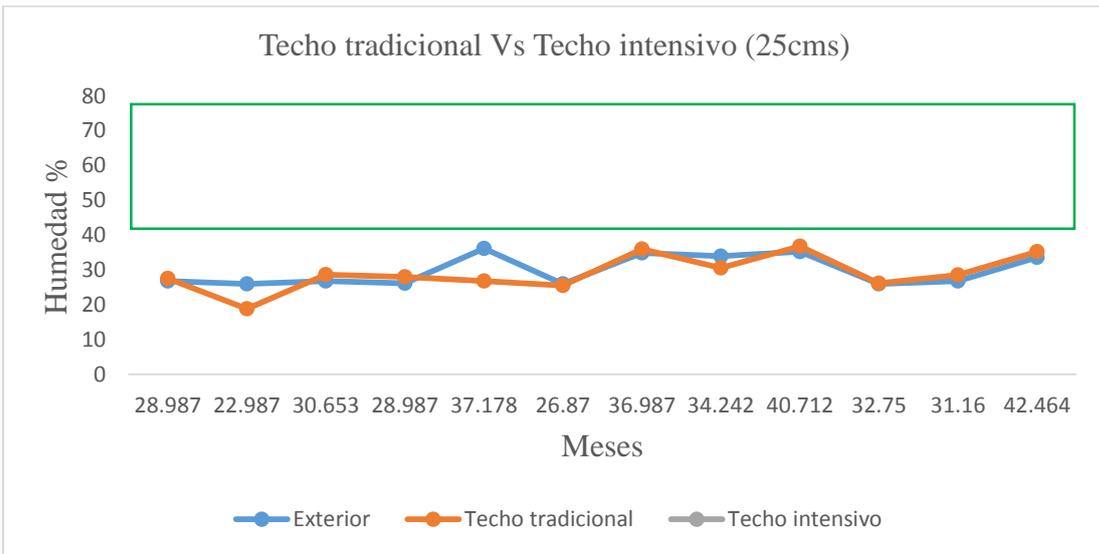
En las gráficas 4.33, 4.34 y 4.35 nos muestra la comparativa de las humedades mínimas del techo tradicional vs los techos verdes, acotándola a la zona de confort de la norma ASRHAE.



**Figura 4.33. Comparativa techo tradicional vs techo extensivo.**



**Figura 4.34. Comparativa techo tradicional vs techo intensivo 15 cm.**



**Figura 4.35. Comparativa techo tradicional vs techo intensivo 15 cm.**

## V. CONCLUSIONES

En éste estudio comparativo del techo convencional contra tecnologías con techos verdes, llegamos a concluir que un techo convencional vs un techo extensivo con espesor de 10cms tiene una tendencia muy similar respecto a las temperatura máximas registradas y solamente los meses de enero a marzo y de noviembre a diciembre, alcanzan el nivel de confort térmico requerido por la norma ASRHAE, al realizar la comparativa de un techo intensivo de 15 cms vs el techo tradicional, hay una disminución de temperatura en

promedio de 2.5°C en favor a la azotea en la cual se instaló la tecnología verde, ésta tiene una variación constante y se encuentra dentro de la zona de confort marcado por la norma; por ultimo si comparamos el techo intensivo de 25 cms contra el techo tradicional tiene diferencia de 1.3°C a favor del techo con tecnología verde, pero de los meses de abril a octubre la temperaturas máximas se encuentra fuera de la zona de confort. Al realizar la comparativa de los techos con tecnologías verdes y el convencional, respecto a las temperaturas mínimas registradas en el año de estudio, se concluyó que ninguno de los dos tipos alcanza el nivel de confort térmico requerido por la norma ASRHAE. Las humedades máximas registradas en el año se encuentran dentro de la zona de confort térmico respecto a la norma ASRHAE, tanto el techo convencional, como los techos de tecnologías verdes excepto en los meses de junio y julio.

Por lo que se concluye que el sistema implementado, no es favorable en los meses con temperaturas bajas, como lo son los meses de noviembre a febrero donde la temperatura llega a oscilar alrededor de los 15.6 °C a los 18.7 °C.

Como resultado del monitoreo y análisis de los datos obtenidos se concluye que con los sistemas de nuevas tecnologías que son techos verdes propuestos confirman la hipótesis.

#### Hipótesis

***“A través de las variaciones de los sustratos de los techos verdes en climas semisecos, se logra disminuir la temperatura interna hasta 5 °C y la humedad relativa hasta un 25 %, en edificios públicos.”***

En el estudio comparativo de un aula con techo tradicional y diferentes aulas con techos verdes intensivos (15, 25 cm) y un techo extensivo (10cm), se llegó a concluir que los techos con tecnologías verdes ayudan a disminuir la temperatura al interior de los edificios y mantiene una humedad relativa constante, y dentro de los rangos aceptados según lo estipulado por la norma.

Los techos verdes intensivos mantienen la temperatura y la humedad relativa constante y dentro de los parámetros que requieren la norma ASRHAE, y de los dos tipos de techos verdes intensivos que se colocaron, el de 15 cm de espesor es el más viable que el de 25 cm, ya que con un espesor menor mantuvo la temperatura requerida por la norma,

aunado a esto, el peso que transmitirá al edificio sería menor y el costo disminuiría ya que a menor espesor menor volumen de material así como menor cantidad de agua de riego.

## REFERENCIAS

- [1] Akbari, H., 1995. Cooling our communities: An overview of heat island project activities. Annual Report, Heat Island Group. Lawrence Berkeley National Laboratory. Berkeley.
- [2] Akbari, H., y Konopacki, S., 2005. Calculating energy- saving potentials of heat- island reduction strategies. *Energy Policy*, 33 (6), 721- 756.
- [3] ASHRAE, ASHRAE Standard 55: Thermal environmental conditions for human occupancy, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 2004.
- [4] Bates AJ, Sadler JP, Mackay R. Vegetation development over four years on two green roofs in the UK. *Urban Forestry Urban Green* 2013;12:98–108.
- [5] Baumann, N., 2006. Ground-nesting birds on green roofs in Switzerland: Preliminary observations. *Urban Habitats*, 4, 37- 50.
- [6] Blanusa T, Vaz Monteiro MM, Fantozzi F, Vysini E, Li Y, Cameron RWF. Alternatives to Sedum on green roofs: Can broad leaf perennial plants offer better ‘cooling service’? *Build Environ* 2013;59:99–106.
- [7] Carter, T., y Jackson, C., 2007. Vegetated roofs for storm water management at multiple spatial scales. *Landscape and Urban Planning*, 80 (1/2), 84- 94.
- [8] Carter, T., y Keeler, A., 2008. Life-cycle cost-benefit analysis of extensive vegetated roof systems. *Journal of Environmental Management*, 87 (3), 350- 363.
- [9] Castleton HF, Stovin V, Beck SBM, Davison JB. Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. *Energy Build* 2010;42:1582–91.
- [10] Cidell J., Beata A. Spatial variation among green building certification categories: Does place matter?, *Landscape and Urban Planning* 91 (2009) 142-151
- [11] Currie, B. A., y Bass, B., 2010. Using green roofs to enhance biodiversity in the City of Toronto. A discussion paper prepared for Toronto City Planning. Toronto. 42 p.
- [12] Chen CF. Performance evaluation and development strategies for green roofs in Taiwan: a review. *Ecol Eng* 2013;52:51–8..
- [12] Dunnett N, Kingsbury N. *Planting green roofs and living walls*. 2nd ed. Portland (OR): Timber Press; 2008.
- [13] Emilsson T. Vegetation development on extensive vegetated green roofs: influence of substrate composition, establishment method and species mix. *Ecol Eng* 2008;33(3–4):265–77.
- [14] Gernot, M., 2004. *Techos verdes. Planificación, ejecución, consejos prácticos*. Fin de Siglo. Montevideo. 85 p.
- [15] Hartig, T., Mang, M., y Evans, G. W., 1991. Restorative effects of natural environment experience *Environment and Behavior*, 23 (1), 3- 26.
- [16] Hui, S. C. M., 2011. Green roof urban farming for buildings in high-density urban cities. Invited paper for the Hainan China World Green Roof Conference, 18- 21 March 2011. Hainan, China.
- [17] Ibáñez Gutiérrez, R. A., 2008. Techos vivos extensivos: Una práctica sostenible por descubrir e investigar en Colombia. *Alarife: Revista de arquitectura*, 61 (16), 21- 36.
- [18] Jaffal I, Ouldboukhite S, Belarbi R. A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. *Renew Energy* 2012;43:157–64.

- [19] Johnston, J., y Newton, J., 2004. *Building Green: A guide to using plants on roofs, walls and pavements*. Mayor of London. London.
- [20] Jun Yang, J., Yu, Q., y Gong, P., 2008. Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmospheric Environment*, 42 (31), 7266- 7273.
- [21] Kortright, R., 2001. *Evaluating the Potential of Green Roof Agriculture: a demonstration project*. City Farmer. Ontario
- [22] Kuhn, M. y Peck, S., 2003. *Design guidelines for green roofs*. Ontario Association of Architects Ontario. 22 p.
- [22] Li, J., Wai, O. W. H., Li, Y. S., Zhan, J., Ho, A., Li, J., y Lam, E., 2010. Effect of green roof on ambient CO2 concentration. *Building and Environment*, 45 (12), 2644- 2651.
- [23] Liu KY, Baskaran BA. NRCC-46412: thermal performance of green roofsthrough field evaluation. Ottawa, Ontario: National Research Council Canada; 2003 [p. 1–10].
- [24] Liu KY, Baskaran A. Using garden roof systems to achieve sustainable building envelopes, vol. 65. *Construction Technology Update*, National Research Council Canada; 2005 [p. 1–6].
- [25] Livingroofs.org y Ecology Consultancy Ltd., 2004. *Green Roofs – Benefits and cost implications*. Birmingham City Council. Birmingham. 83 p.
- [26] López Serna, M., 2010. *Un acercamiento a las Cubiertas Verdes*. F.B.P S.A. Medellin.
- [27] Morau D, Rakotondramiarana H, Andriamamonjy Al. Simple model for the theoretical survey of the green roof thermal behavior. *J Technol Innovat Renew Energy* 2012;1(2):92–102.
- [28] Nagase, A., y Dunnett, N., 2010. Drought tolerance in different vegetation types for extensive green roofs: Effects of watering and diversity. *Landscape & Urban Planning*, 97 (4), 318- 327
- [29] Nowak, D. J., Crane, D. E., y Stevens, J. C., 2006. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry & Urban Greening*, 4, 115- 123.
- [30] Parizotto S, Lamberts R. Investigations of green roof thermal performance in temperature climate: a case study of an experimental building in Florianopolis city, Southern Brazil. *Energy Build* 2011;43:1712–22.
- [31] Samangoei, M., 2006. *Green spaces in the sky. What role do green roofs play in a Twenty-first century city?* Tesis de grado no publicada. Department of Architecture. Oxford Brookes University, Oxford.
- [32] Scholz- Barth, K., y Tanner, S., 2004. *Federal Technology Alert: Green Roofs*. DOE Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE). U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy. Washington.
- [33] Teemusk, A., y Mander, U., 2009. Greenroof potential to reduce temperature fluctuations of a roof membrane: A case study from Estonia. *Building and Environment*, 44 (3), 643– 650.
- [34] Theodosiou T. Green roofs in buildings: thermal and environmental behaviour. *Adv Build Energy Res* 2009;3:271–88.
- [35] Weng Q, Lu D, Schubring J. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sens Environ* 2004;89(4):467–83.
- [36] Wong, N. H., Tay, S. F., Wong, R., Ong, C. L., y Sia, A., 2003. Life cycle cost analysis of rooftop gardens in Singapore. *Building and Environment*, 38 (3), 499- 509.

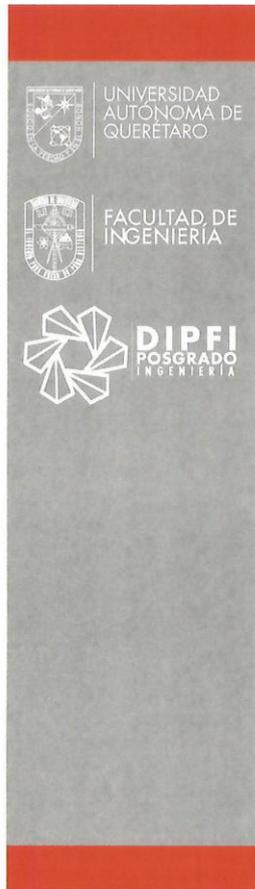
[37] Wong, N. H., Cheong, D. K. W., Yan, H., Soh, J., Ong, C. L., y Sia, A., 2003. The effect of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore. *Energy and Buildings*, 35 (4), 353- 364.

[37] Yang J, Yu Q, Gong P. Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmos Environ* 2008; 42(31):7266–73.

[38] Yok Tan, P., y Sia, A., 2005. A pilot green roof research project in Singapore (pp. 4- 6). En Proc. of 3rd North American Green Roof Conference: Greening rooftops for sustainable communities, Washington, DC.

## ANEXOS

PRODUCTIVIDAD.



# Otorgan la presente CONSTANCIA a:

Guadalupe RAMOS SILVA  
G. J RÍOS MORENO  
M. TREJO PEREA  
J. L. Reyes Araiza

Por su ponencia:

"Techos verdes como alternativa para generar confort térmico  
al interior de las aulas educativas"



26 de noviembre de 2015

  
Dr. Aurelio Domínguez González  
DIRECTOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA

  
Dr. Manuel Toledano Ayala  
JEFE DE LA DIVISIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO  
FACULTAD DE INGENIERÍA

**CONIIN 2016** <coniin2016@easychair.org>

para mí ▾

Dear Author,

Your paper was received and after review by the head of the Congress Scientific Committee has been accepted for oral presentation at the 12th CONIIN-2016, and to be published in the congress book "Engineering and Applications vol. 2". (ISSN in process).

Below you will find the comments from the reviewers, please note that the decision is final and for non-reason will be changed. Please take note of the changes and send the final work by the same media (Easychair management page) before April 8th, 2016. If there is no change in your work (by the reviewers comments), please upload the work as a final version. After this date, your work will be dismissed if the final version has not been sent.

The format oral presentation is free, you will have 15 minutes for the presentation and 5 minutes for questions.

The presentation date will be posted on the website in the program section with the submission number next week. So please be patient and don't forget you submission number. The event is at the Parque Biotecnológico building, top floor. Please be present the day of your presentation early in the morning or at least 30 minutes before the presentation to upload you file at the room computer to avoid any delay.

For the Biosystems and Automation SJR oral presentations the venue is according to its availability camp program.

----- REVIEW 1 -----

PAPER: 20

TITLE: Green roofs to generate thermal comfort inside school buildings

AUTHORS: Guadalupe Ramos Silva, Jose Gabriel Rios Moreno, Jose Luis Reyes Araiza and Mario Trejo Perea

OVERALL EVALUATION: 2 (accept)