UNIVERSIDAD VERACRUZANA

FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y AGROPECUARIAS
Región Poza Rica-Tuxpan

Maestría en Ciencias del Ambiente

TRABAJO DE INTERVENCIÓN

“Análisis del comportamiento térmico, beneficios y costos, de dos tipos de techos verdes en sistema modular, en Poza Rica, Veracruz”

PRESENTA

L.E.M. Karen Aurora Cortés Sosa

Directora

Dra. Maribel Ortiz Domínguez

Codirectora

Mtra. Blanca Esther Raya Cruz

Tuxpan, Veracruz enero 2019

El presente trabajo de intervención **"Análisis del comportamiento térmico, beneficios y costos, de dos tipos de techos verdes en sistema modular, en Poza Rica, Veracruz"**, realizado por la C. Karen Aurora Cortés Sosa, bajo la dirección de la Dra. Maribel Ortiz Domínguez y la Mtra. Blanca Esther Raya Cruz ha sido revisado y aprobado como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS DEL AMBIENTE

Dra. Maribel Ortiz Domínguez

Directora de tesis

Mtra. Blanca Esther Raya Cruz

Codirectora de tesis

Tuxpan de Rodríguez Cano, Veracruz. Diciembre 2018.

Universidad Veracruzana

UNIVERSIDAD VERACRUZANA

FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y AGROPECUARIAS

MAESTRÍA EN CIENCIAS DEL AMBIENTE

Revisión del Trabajo de Intervención de la alumna: LIC. **Karen Aurora Cortés Sosa**

JURADO EXAMINADOR

NOMBRE	FECHA	DICTAMEN	FIRMA
Noé Velázquez Rosas	7/12/2018	Aprobado	
Agustín de Jesús Basáñez Muñoz	07/12/2018	APROBADO	
Francisco Limón Salvador	10-12-2018	Aprobado	

En la presente revisión se acordó que el Trabajo de Intervención denominado "**Análisis del comportamiento térmico, beneficios y costos, de dos tipos de techos verdes en sistema modular, en Poza Rica, Veracruz**" que presenta la sustentante para obtener el Grado de Maestra, está terminado por lo que puede proceder a su inmediata impresión.

AGRADECIMIENTOS

Principalmente al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico brindado durante mis estudios de maestría como becaria con numero 785899, gracias a esta institución por la oportunidad brindada, que me permitió la realización de este proyecto.

A la Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias de UV campus Tuxpan, por su contribución con aporte de enseñanzas, información, servicios e instalaciones.

A mis profesores por compartir todos sus conocimientos y experiencia, por todas sus enseñanzas que han sido tan valiosas para mi formación tanto académica como personal.

A la DRA. MARIBEL ORTÍZ DOMINGUEZ, mi directora de tesis, por su presencia al dirigirme y brindarme su apoyo en mi proyecto de intervención, por sus apreciados y relevantes aportes que fueron clave para la realización de presente trabajo, sus siempre relevantes críticas, comentarios y sugerencias

A la MTRA. BLANCA ESTHER RAYA CRUZ, mi Co-directora de tesis y profesora, por su constante y paciente seguimiento, por su guía, apoyo y por compartir su tiempo durante el desarrollo del presente trabajo.

Al DR. JOSÉ LUIS ALANÍS MÉNDEZ, mi tutor y director de la Maestría en Ciencias del Ambiente, un intelectual al que admiro por su gran preparación, valorables consejos y su sostenido apoyo moral.

Al DR. ALEJANDRO SOSA MARTÍNEZ por su espíritu servicial, su empuje al inicio y parte del desarrollo de mi proyecto, sus invaluables consejos, apoyo moral, su asistencia profesional y por impulsarme a seguir adelante.

Al DR. NOE VELÁZQUEZ ROSAS, miembro del jurado y profesor, por su colaboración y asistencia profesional al poner a disposición toda su información y conocimientos en estadística, lo que facilito el análisis detallado del presente proyecto, por su lectura del manuscrito y sus invaluables sugerencias y críticas constructivas que fueron un gran aporte al trabajo, además de sus enseñanzas como docente.

Al MTRO. AGUSTÍN DE JESUS BASAÑES MUÑOZ, miembro del jurado, por su asesoría y lectura del manuscrito, sus observaciones y contribución al ordenamiento y mejoramiento del presente proyecto, su colaboración y conocimientos atinados en todo momento, que aportaron elementos clave para la estructura del trabajo.

Al Dr. FRANCISCO LIMÓN SALVADOR, miembro del jurado y profesor, por su colaboración, tiempo invertido y dedicación al revisar mi trabajo, sus valiosas sugerencias, comentarios constructivos y observaciones atinadas que enriquecieron el presente trabajo, además de sus enseñanzas impartidas dentro del aula de clases.

DEDICATORIAS

A MIS PADRES:

Aurora Sosa Martínez

Carlos Gerardo Cortés Florencia

Mi más profundo agradecimiento, amor y admiración por ser las personas que son, por haberme educado y formado en la mejor medida posible, por sus valores inculcados, por todo su amor y apoyo siempre incondicional y sobre todo por su motivación constante que me ha permitido siempre seguir adelante.

A MIS ABUELOS:

Aurora Martínez Del Ángel

Alfonso Sosa Fernández

Con todo mi cariño y admiración por sus ejemplos de perseverancia y constancia, gracias por todo su apoyo y cuidados, sus invaluables palabras y muestras de afecto, por ser los pilares de la familia, predicar con su ejemplo y transmitirme las ganas de superación.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS iii
DEDICATORIAS v
ÍNDICE GENERAL vi
ÍNDICE DE CUADROS viii
ÍNDICE DE FIGURAS ix
RESUMEN x
I. INTRODUCCIÓN 1
II. ANTECEDENTES 4
2.1 Estructura básica de los techos verdes. 4
2.2 Principales beneficios de la implementación de techos verdes 5
2.2.1 Beneficios cualitativos y sociales 5
2.2.2 Beneficios técnicos locales 7
2.2.3 Beneficios cuantitativos y económicos 8
2.3 Techos verdes en el marco internacional 9
2.4 Techos verdes en el marco nacional 12
2.5 Techos verdes en el marco local 13
III. OBJETIVOS 16
3.1 Objetivo general 16
3.2 Objetivos específicos 16
IV. ÁREA DE ESTUDIO 17
4.1 Ubicación geográfica 17
4.2 Clima 18
4.3 Localización del sistema modular 18
V. MATERIAL Y MÉTODOS 20
5.1 Técnica de construcción 20

5.2 Análisis de datos 26
5.3 Análisis del comportamiento térmico, beneficios y costos 27
VI. RESULTADOS 28
6.1 Diferencias térmicas entre los tratamientos 28
6.2 Costos de implementación y mantenimiento 35
6.3 Extrapolación de costos 40
VII. DISCUSIÓN 41
7.1 Diseño e instalación de techos verdes 41
7.2 Análisis de los efectos térmicos del sistema modular 43
7.3 Costos del sistema y extrapolaciones 45
7.4 Beneficios de los techos verdes 47
VIII. CONCLUSIONES 51
IX. RECOMENDACIONES 53
X. APLICACIÓN PRACTICA 54
XI. BIBLIOGRAFÍA 55
Anexo 1 66
Anexo 2 67
Anexo 3 70

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Anova de factores A, B y C. 28

Cuadro 2. Costos del proyecto general. 36

Cuadro 3. Costos de módulo testigo. 37

Cuadro 4. Costo de módulo de tipo extensivo. 38

Cuadro 5. Costos de módulo de tipo semi-Intensivo. 39

Cuadro 6. Proyección de costos según superficie y cubierta. 40

Cuadro 7. Capacidad de enfriamiento requerida por área. 71

Cuadro 8. Proyección anual por uso de aires acondicionados. 73

Cuadro 9. Comparativo de costos de sistemas de climatización. 74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de Poza Rica. 17

Figura 2. Climograma de Poza Rica (periodo 2014-2018). 18

Figura 3. Casa Habitación. 19

Figura 4. Proceso de construcción de los módulos experimentales. 21

Figura 5. Toma de temperaturas. 25

Figura 6. Sistema modular. 25

Figura 7. Distribución de las unidades. 26

Figura 8. Temperaturas promedio por tipo de módulo en la temporada cálido- seca (abril- mayo). 30

Figura 9. Temperaturas promedio por tipo de módulo en la temporada cálido-húmeda (junio- octubre). 30

Figura 10. Temperaturas promedio por tipo de módulo en la temporada fría-húmeda (noviembre- diciembre). 32

Figura 11. Temperaturas promedio por tipo de módulo en la temporada fría- seca (enero- marzo). 32

Figura 12. Temperatura promedio de módulo extensivo durante un año. 33

Figura 13. Temperatura promedio de módulo semi-intensivo durante un año. 34

Figura 14. Temperatura promedio de módulo testigo durante un año. 34

RESUMEN

El incremento urbano ha ocasionado la remoción de vegetación debido a la creciente de construcciones., Esto ha provocado un aumento de la temperatura en las ciudades. Aunado a esto, la operación de las edificaciones para lograr confort genera un gran consumo de energía, lo que ha traído repercusiones ambientales, sociales y económicas. Los techos verdes son una herramienta ecológica, que ayudan a aminorar el calentamiento de las azoteas en las casas habitación, edificios, y contribuye a generar confort al interior de estas. Esto propicia la reducción de uso de sistemas de climatización artificial y por consecuente el consumo de energía, entre muchos otros beneficios. Por esta razón, el objetivo de éste trabajo fue evaluar el efecto térmico, beneficios y costos, de dos tipos de techos verdes, extensivo y semi intensivo, respecto a un control, mediante su implementación en módulos y monitoreo durante un año. Los resultados demuestran tener efectos térmicos positivos, al disminuir el calor en temporadas cálidas y evitando la pérdida de temperatura en las frías, lo que permite considerar su utilización como sistemas auxiliares en el desempeño térmico de las casas habitación, contribuyendo al mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes de la zona.

I. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se ha presentado un aumento en la temperatura ambiente promedio (Flores, 2015), las ciudades enfrentan problemas de sobrecalentamiento y como consecuencia el deterioro de confort térmico, la calidad del aire y problemas de contaminación, ya que la vegetación en el paisaje urbano se ha reducido en gran medida debido al incontrolado aumento de construcciones como resultado de la expansión urbana (Maldonado, 2009). Esto tiene repercusiones tanto en la salud y bienestar de los seres humanos, como en el deterioro del medio ambiente (Alpuche *et al.,* 2010).

Debido a que el ser humano pasa gran parte de su vida en sus casas- habitación y otras edificaciones, estas son fundamentales para satisfacer sus necesidades de confort (Olyay, 2002). Sin embargo, el uso de electrodomésticos para la operación de éstas, representa un gran consumo de energía eléctrica y genera contaminación (Huovila, 2007). Esto es particularmente grave en los sistemas de climatización, que son utilizados gran parte del día, en lugares de climas cálidos tropicales y/o en temporadas cálidas, cuando se vuelven necesarios para mantener una temperatura confortable (Villa, 2009).

La utilización sistemas de climatización representa el mayor consumo de energía eléctrica en los hogares, con un porcentaje aproximado de más del 70% (Cheng *et al*., 2008); debido al constante aumento de su precio, la posibilidad de reducir su uso y por consiguiente costos, resulta cada vez más importante. La forma más

eficiente para refrescar las casas-habitación y poder reducir el consumo de energía en los meses de calor, es prevenir que se calienten en primer lugar (Arif, 2010), para lo cual se obtienen mejores resultados aislando térmicamente los techos, lo que contribuye a mantener el confort interno (Rebolledo, 2011).

Por lo tanto, es de suma importancia considerar la utilización de métodos que contribuyan a crear temperaturas agradables al interior de las edificaciones, y que tengan un desempeño eficiente en términos de consumo de energía y protección al medio ambiente (Rocha, 2011). Una alternativa ideal son las construcciones verdes, un ejemplo de esto son los techos verdes, los cuales presentan la oportunidad de tener una superficie con vegetación que contribuye a mejorar las temperaturas y brinda otros beneficios cualitativos, mediante la utilización de espacios desaprovechados (Rodríguez y Morillón, 2007; Contreras y Castillo, 2015).

Los techos verdes son cubiertas diseñadas para recrear las condiciones naturales de los sustratos del suelo, se pueden cultivar en una capa delgada de suelo y la mayoría requiere de una versión de solo tres capas: la membrana impermeable, el sustrato y la vegetación (Gavilanes, 2015) y adicionalmente pueden incluir una capa anti raíces, y un sistema de drenaje (Pandey *et al.,* 2013), lo que permite el cultivo y desarrollo de vegetación; en estos sistemas la cobertura de vegetación puede ser total o parcial, en módulos (Carpenter, 2014). Los sistemas de techos verdes pueden ser clasificados en intensivos, semi-intensivos o extensivos, según la profundidad del medio de cultivo y el grado de mantenimiento requerido (anexo

1), su cubierta suele tener un peso de 80-200 kg/ m^2 y en general se visitan solo para su mantenimiento (Rosatto *et al.,* 2012). Los techos verdes brindan múltiples beneficios a nivel ambiental, económico y social. La regulación térmica es uno de los más reconocidos y la principal razón de su utilización; sin embargo, no todos los sistemas constructivos tienen las mismas posibilidades de aplicación, para lograr su eficiencia se deben considerar desde su planificación y construcción (Barahona, 2011), ya que cada uno responde, térmicamente hablando, a las condiciones climáticas del lugar (Lagunes, 2016).

La ciudad de Poza Rica, está ubicada en un clima tropical cálido subhúmedo con una temperatura media de 30°C durante las temporadas cálidas, por lo que la implementación de sistemas de techos verdes es una buena opción, dadas las altas temperaturas presentes la mayor parte del año, se pueden utilizar como herramienta para contribuir a la regulación térmica de las casas- habitación, brindando beneficios económicos, sociales y ambientales.

Este estudio realizó un análisis del comportamiento térmico, beneficios y costos de dos tipos de techos verdes, mediante la implementación a nivel experimental y monitoreo de un sistema modular que incluya componentes disponibles en la ciudad y que se puedan adaptar al clima especifico de esta; tomando en cuenta sus respectivos costos de implementación y mantenimiento, con el fin de determinar cuáles son los factores que determinan que el uso de estos sistemas sea benéfico.

II. ANTECEDENTES

2.1 Estructura básica de los techos verdes.

Los techos verdes pueden implementarse de forma tradicional o mediante un sistema modular (Jiménez-López *et al*., 2013). El sistema tradicional es la aplicación de las capas que componen un techo verde en la totalidad de la losa en forma continua, dejando los espacios necesarios para el desagüe, los espacios transitables, y los bordes, mientras que el sistema modular es aquel que está contenido en bandejas diseñadas para cada caso, que conforman los módulos y posibilita implementar diferentes especies que requirieran diferentes profundidades de sustrato; además de que evitan el contacto directo del sistema con el techo (Grimoldi, 2009).

Aunque sistema tradicional de techos verde ha sido el más utilizado a través de los años, la implementación de los sistemas modulares está creciendo gradualmente debido a que su instalación y reparación resulta más fácil de llevar, además de tener un gran carácter ornamental. (Gonzáles Couret y Gonzáles Pérez, 2016).

2.2 Principales beneficios de la implementación de techos verdes

2.2.1 Beneficios cualitativos y sociales

Los techos vegetales han demostrado reducir el calentamiento urbano e “islas de calor” presentes en las zonas urbanas y suburbanas; las plantas extraen calor de su ambiente, absorbiendo energía solar por medio de sus procesos de fotosíntesis (del 5 al 20%), evotranspiración (del 20 al 40%) y su sombra. Este efecto se hace perceptible principalmente en las temporadas cálidas. Así, las superficies verdes facilitan un clima más fresco en la ciudad (García, 2010).

La inclusión de techos verdes en las ciudades aporta gran valor estético, transformando el paisaje urbano y aumentando su atractivo visual. Esta naturación tiene influencia en el buen estado de ánimo de las personas, y es un elemento que representa conciencia social y ambiental y brinda una mayor calidad de salud ambiental. Los techos verdes revalorizan las áreas y producen cambios que paulatinamente mejoran el aspecto y la composición de la urbe (Arregui, 2016).

Debido a su vegetación, los techos verdes posibilitan el desarrollo de un hábitat natural, permitiendo la inclusión de la naturaleza a la vida cotidiana, las diferentes especies de vegetación plantadas generan disponibilidad y variedad de alimentos y recursos para diversas especies principalmente invertebrados, debido a su capacidad de dispersión y su baja demanda de recursos para suplir sus necesidades; algunas especies de aves utilizan los techos verdes para

reproducirse o anidar y como hábitats temporales, debido a que sus hábitats han sido fragmentados, han demostrado tener la capacidad de adaptarse a cambios del paisaje urbano.

Lo anterior facilita las actividades de cuidado ambiental, ayudando a reconstruir la relación entre las personas y el planeta integralmente (Victorio, 2017).

Los techos verdes han demostrado brindar beneficios psicológicos y físicos al fungir como purificadores de aire, además de contribuir a la reducción de estrés, la relajación y regeneración, incluso han influido en la recuperación de la salud física y mental de pacientes en hospitales (Ibáñez, 2008., Zielinski, García y Vega, 2012).

Debido a los beneficios sociales y ambientales antes mencionados que brindan los techos verdes, minimizan la huella ambiental, que produce el crecimiento demográfico desmesurado y los altos índices de construcción ofreciendo una alternancia de superficies verdes, permeables y de oxigenación natural (Ibáñez, 2008; Ramírez y Bolaños-Silva, 2012).

2.2.2 Beneficios técnicos locales

Los techos verdes actúan como barreras de sonido, propiciando una reducción significativa de ruido al interior de un edificio, el sustrato mediante su porosidad atenúa el sonido, cuando este penetra su medio de crecimiento e interactúa con las partículas, bloqueando las ondas de baja frecuencia. Su espesor determina la reducción de ondas sonoras, 12 cm de sustrato reducen aproximadamente 40 decibeles y 20 cm, 46 decibeles. Las plantas tienen la capacidad de absorber ondas de alta frecuencia, debido a sus capas de aire. Estos componentes absorben las ondas de sonido, y/o las reflejan y desvían, principalmente las emitidas por vehículos, aviones y maquinaria (Marchena, 2012).

Debido a sus propiedades, la vegetación de las cubiertas verdes, tiene la capacidad de amortiguar las variaciones térmicas que experimentan las construcciones de concreto, asfalto y hormigón tanto al exterior como interior, durante los meses cálidos y fríos, han demostrado también reducir las variaciones de temperatura del ciclo día- noche (Zielinski, García y Vega, 2012).

La reducción de calor que genera un techo verde, se debe a su capa de sustrato que funciona como un colchón, que protege la losa de los intensos rayos solares ocasionando una pérdida de calor latente. Durante los meses fríos gran parte de la radiación térmica del techo es absorbida por las hojas, y la densidad de las plantas

impide que el viento llegue a la superficie del sustrato provocando una falta de movimiento en el aire que disminuye la perdida de calor (Minke, 2009).

2.2.3 Beneficios cuantitativos y económicos

El aislamiento térmico generado por los techos verdes propicia un aumento de confort en el interior de la edificación, lo que genera una disminución en el consumo de electricidad necesaria para regular la temperatura interna de los edificios, contribuyendo a un ahorro energético en cuanto a los sistemas de climatización, además ayuda a proteger las losas, su impermeabilización, y membranas del daño solar, lo que puede reflejarse en un aumento de la vida útil del techo y/o del costo comercial del edificio también (Barahona, 2011., Canales, 2014).

Los techos verdes contribuyen a la absorción de las aguas pluviales, sus plantas y sustrato almacenan el agua a partir de un efecto “esponja”, las plantas además han demostrado tener una probabilidad del 80% de influir en la atenuación de la escorrentía. Los techos vegetales ayudan a reducir la contaminación y altas concentraciones de zinc, de las aguas pluviales de escorrentía urbana, mediante la absorción y filtración de estos contaminantes, además de mitigar la inundación de determinada zona, para posteriormente devolver la precipitación por medio de la evaporación (Marchena, 2012; Suavita, 2014).

Mediante el proceso de fotosíntesis la vegetación plantada en los techos verdes, absorbe dióxido de carbono, y lo transforma en O_2 oxígeno. Estas superficies verdes reducen los niveles de smog y polvo; la vegetación a través de su superficie foliar ayuda a filtrar y retener partículas contaminantes de polvo, aerosoles y metales suspendidos, mediante la oscilación del aire, 1 m^3 de techo verde puede atrapar aproximadamente 130 g de polvo al año, estas partículas son finalmente arrastradas por el agua de lluvia e incorporadas al suelo o conducidas a desagües (Arregui, 2016).

Los techos verdes permiten el cultivo de hortalizas, convirtiéndose en un espacio productivo, lo que favorece la seguridad alimentaria de las familias que hagan uso de estos sistemas. La venta de hortalizas representa también una fuente de ingresos adicional, y ganancias por mano de obra, contribuyendo así, al desarrollo socioeconómico por medio de la producción, autoconsumo y venta (Cortés y Castillo, 2012).

2.3 Techos verdes en el marco internacional

La vegetación en los techos se ha utilizado desde hace siglos debido a la disponibilidad y bajo costo de sus componentes como sustrato y vegetación, y los efectos de aislamiento térmico que brindan, en algunos países de bajas temperaturas como Escandivia, Islandia, Canadá y USA, cumplían con la función

de almacenar el calor de los ambientes interiores y en los países de climas tropicales y altas temperaturas como Tanzania, contribuían a la mitigación de calor proveniente del exterior al retenerlo, impidiendo que pasara de manera directa hacia el interior de las casas- habitación (Minke, 2009).

Los techos verdes como sistemas, se comenzaron a emplear en el continente europeo en los sesentas, desarrollados en Alemania, que actualmente cuenta con más de 15 millones de m^2 de techos verdes en sus construcciones, gracias a que ha incentivado su utilización y están incluidos en su legislación como requisito para construcciones grandes, así como en mayoría de los países europeos (Sánchez, 2012).

En el continente americano, se inició con el uso de techos verdes en Estados Unidos, en donde se han realizado múltiples estudios acerca de la capacidad de estos sistemas de mitigar las fluctuaciones térmicas en las edificaciones, y reducir su consumo energético, en los cuales se han encontrado amortiguaciones de temperatura de hasta 10 °C, siendo más notorias en temporadas cálidas, y reducciones en consumo energético de un 25%, tal es el caso del el techo verde instalado en City Hall (edificio sede oficial de gobierno) en Chicago (Dvorak, 2009).

En Centroamérica también se han llevado a cabo estudios acerca de los beneficios térmicos del uso de techos verdes, en República Dominicana, Feliz (2016) encontró que la implementación de techos verdes en edificaciones que utilizan aparatos electrónicos, es más efectiva en países de clima tropical con

temperaturas promedio de 34 º C en verano, en donde los techos logran reducir el gasto energético por el uso de estos aparatos, y el tiempo de uso de equipos de aire acondicionado, al propiciar temperaturas más confortables al interior de los edificios con azotea verde.

En Sudamérica, los sistemas de cubiertas verdes han tenido un desarrollo creciente (Ibáñez, 2008), se han realizado múltiples investigaciones e implementaciones de techos verdes con el fin de dar solución a problemas generados por urbanización como alteración de temperaturas en las edificaciones, los efectos de las islas de calor, la contaminación del aire, exceso de escorrentía, remoción de áreas verdes y destrucción de hábitats.

En varias ciudades de Colombia se han desarrollado y evaluado prototipos de techos verdes, con el fin de determinar su capacidad de amortiguar la temperatura en casas- habitación y otras edificaciones, y evaluar los costos que genera el uso de esta técnica en climas cálidos sub-húmedos, obteniendo que los techos verdes fungen como sistemas de protección solar y enfriamiento pasivo eficiente, que regulan la temperatura y contribuyen a mejorar el comportamiento térmico en espacios interiores, y que su uso representa costos accesibles para la población en general. Se determinó que los techos verdes son una alternativa eficiente, económica y ambientalmente apropiada para refrescar viviendas (Duarte y Moreno, 2014; Osuna *et al.* 2017).

En Argentina se han estudiado también los efectos térmicos de los techos verdes, Miguel y Analía (2016) los evaluaron durante un año, en sistemas modulares con especies de poco mantenimiento y resistentes al bajo consumo hídrico, determinando que las azoteas con módulos vegetales presentaron temperaturas menores a la temperatura ambiente promedio, con diferencias de 5 a 10ºC durante los meses cálidos.

Alrededor del mundo la incorporación de superficies con vegetación ha demostrado brindar múltiples beneficios, con una mayor eficiencia en los entornos de mayor densidad humana y climas cálidos, destacando sus efectos de regulación térmica.

2.4 Techos verdes en el marco nacional

En México la búsqueda de confort y disminución de la contaminación ambiental han propiciado la implementación de tecnologías ambientales como los techos verdes, y su uso se ha incentivado e incluido en la legislación (anexo 2), con el fin de impulsar esta tecnología en pro de las edificaciones sustentables.

Ciudad de México es sede de la azotea verde más grande de Latinoamérica, implementada en los edificios del INFONAVIT, cuenta con un área total de más de 5,000 m^2, que consta de espacios recreativos y de descanso, y un invernadero con producción de hortalizas. Esta azotea verde ha demostrado brindar múltiples

beneficios sociales y ambientales como el aporte de valor estético, conservación de hábitat de varias especies, de flora, amortiguación de ruido y temperaturas, beneficios a la salud, económicos como absorción de escorrentía, purificación del aire, disminución de consumo energético y aumento del valor del inmueble (Sika, 2014).

Se han estudiado y comparado también los componentes de los techos verdes, con el fin de probar su efectividad, en Yucatán, Duarte y Moreno (2014) analizaron varias especies de plantas y sustratos empleados en estos sistemas, determinando que los componentes más efectivos a utilizar son los sustratos con menor peso seco y varias especies de Kalanchoe, en el caso de climas cálidos y de altas temperaturas, como lo es el del lugar de estudio.

2.5 Techos verdes en el marco local

En la cuidad de Poza Rica, se han documentado ensayos de tipo experimentales y estudios de techos verdes principalmente con fines de mitigación de islas de calor y regulación térmica en edificios.

En el primer ensayo, Martínez (2012) implementó en la Universidad Veracruzana (Facultad de Ciencias Químicas) un techo verde tradicional de tipo extensivo empleando pasto San Agustín *(Stenotaphrum secundatum)*, con el fin de estimar el efecto de estas áreas verdes en la formación de islas de calor, durante los

meses de abril y mayo que corresponden a la temporada cálido-seca, obteniendo como resultado disminuciones de temperatura de hasta 5 °C respecto a las de una azotea convencional (testigo) de la facultad y siendo similares a temperatura de una estación monitoreada fuera de la ciudad, sin islas de calor.

Posteriormente Flores (2013), en su estudio para determinar el efecto que tienen dos techos verdes en la mitigación de calor, midió durante los meses de enero a marzo (temporada fría- seca), el techo implementado por Martínez en 2012, y lo comparo con otro techo convencional de la facultad, obteniendo una disminución de 0.18 °C, y un segundo techo extensivo, implementando en la Colonia Bella Vista lo comparó con la temperatura ambiente proporcionada por el municipio, presentando una disminución de 0.74 °C.

En el último caso, Del Ángel (2013), evaluó los efectos térmicos de la vegetación y sustrato que conforman un techo verde, mediante la implementación y monitoreo de un sistema modular de seis unidades, en la Facultad de Ciencias Químicas (UV); cada unidad incluyo diferentes combinaciones de vegetación y sustrato, incluyendo tierra negra, piedra volcánica y especies como Duranta, Sábila y Amaranto, resultando más eficientes en cuanto a regulación térmica, los módulos que contenían tierra negra.

Con estos ensayos como antecedentes en la ciudad de Poza Rica, Veracruz, se pudo observar que los techos implementados brindaron beneficios, destacando sus defectos térmicos, los cuales variaron de acuerdo al tipo de sistema y las

temporadas en que fueron estudiados, por lo que es notable la necesidad de seguir desarrollando nuevas técnicas con el fin de conseguir una mayor eficiencia en el empleo de esta tecnología en la ciudad. El tema está sujeto a mayores demostraciones mediante la implementación de más unidades de muestreo, para contar con un marco más amplio de resultados que comparar, y tener conclusiones que se puedan generalizar para la cuidad de Poza Rica.

III. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

- Evaluar el comportamiento térmico, beneficios y costos en dos tipos de módulos utilizados como techos verdes en la ciudad de Poza Rica, Veracruz.

3.2 Objetivos específicos

- Diseñar e instalar dos tipos de módulos para ser implementados como techos verdes.
- Determinar las diferencias térmicas durante un año entre los tipos de módulos utilizados como techo verde.
- Establecer los costos y beneficios entre los tipos de módulos aplicados como techo verde.

IV. ÁREA DE ESTUDIO

4.1 Ubicación geográfica

El trabajo se llevó a cabo en la cuidad de Poza Rica de Hidalgo, Veracruz de Ignacio de la Llave, ubicado entre los paralelos 20º 29’ y 20º 36’ de latitud norte y los meridianos 97º 24’ y 97º 29’ de longitud oeste; altitud entre 40 y 200 m. Colinda al norte con los municipios de Tihuatlán y Papantla; al este con el municipio de Papantla; al sur con los municipios de Papantla y Coatzintla; al oeste con los municipios de Coatzintla y Tihuatlán (Figura 1).

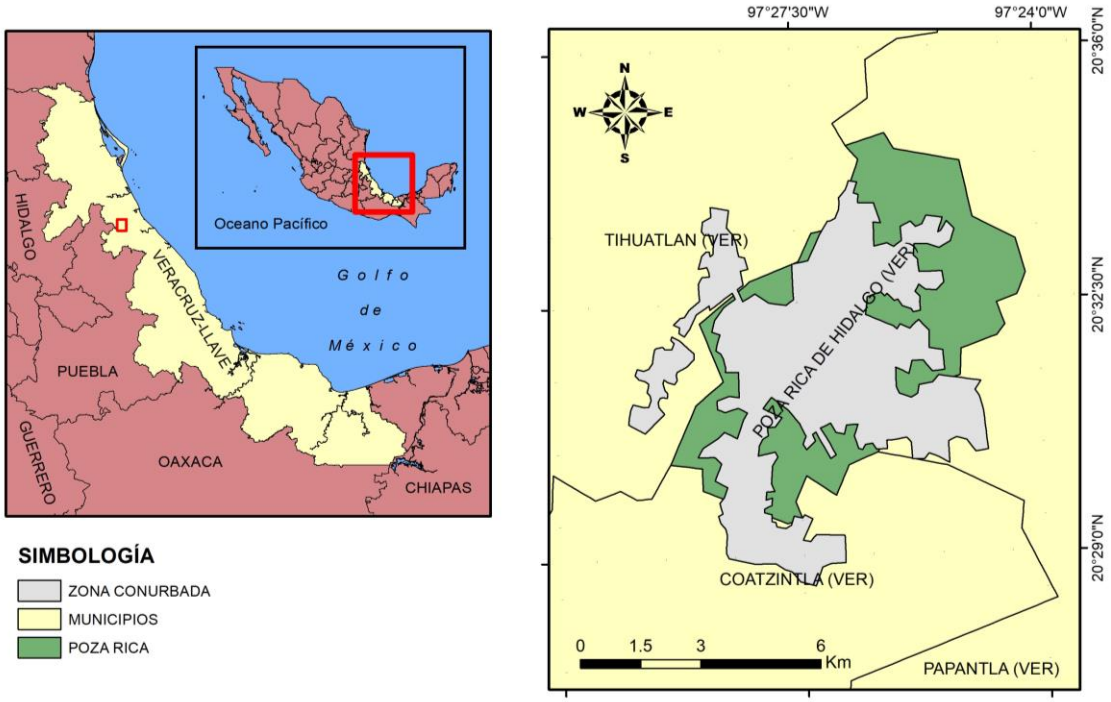

Figura 1. Ubicación de Poza Rica.

4.2 Clima

Cuenta con un clima cálido subhúmedo con lluvias en verano, y un rango de temperatura de 28 a 30º C y un rango de precipitación de 72 – 216 mm (Figura 2).

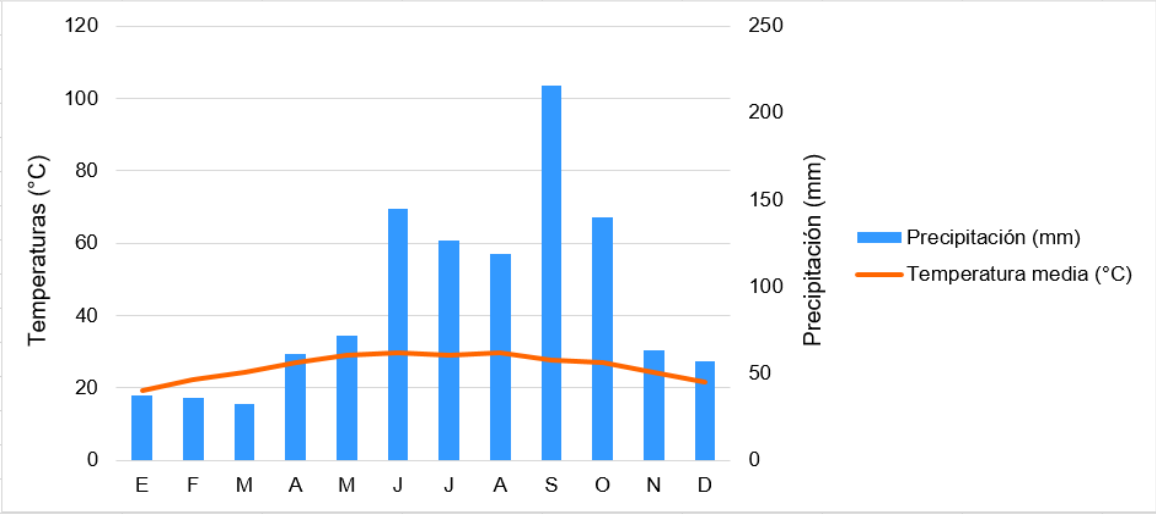

Figura 2. Climograma de Poza Rica (periodo 2014-2018).

4.3 Localización del sistema modular

El sistema modular de techos verdes se instaló en el techo con losa de concreto, de una casa-habitación (de un piso) ubicada en la Calle Cruz del Sur no. 7, Colonia Laredo (Figura 3).

Figura 3. Casa Habitación.

V. MATERIAL Y MÉTODOS

Antes de implementar los módulos, se determinaron los componentes básicos de un techo verde de acuerdo a la literatura revisada, los cuales incluyen varias capas que conforman el sistema; se utilizaron materiales disponibles localmente, y posteriormente se obtuvieron los costos de implementación tanto del sistema modular completo como de cada tipo de módulo, los cuales fueron extensivo, semi-intensivo y testigo. El trabajo de campo consistió en establecer las unidades experimentales, el mantenimiento, y la toma de temperaturas, y finalmente se hizo un análisis estadístico del comportamiento térmico, sus costos y otros beneficios.

Para el diseño experimental se tomaron en cuenta 3 factores, el primero es el tipo de modulo (factor A), con 3 niveles: techo verde extensivo, techo verde semi-intensivo y testigo, con 5 réplicas para cada condición, el segundo factor son las temporadas (factor B), con 4 niveles: temporada fría- seca, cálido- seca, cálido-húmeda, y fría- húmeda y el tercer factor corresponde a los horarios (factor C), con 3 niveles: 8:00 am, 2:00 pm y 8:00 pm.

5.1 Técnica de construcción

El proceso de elaboración se compone de una serie de pasos, de forma gráfica se presentan en la figura 4; previo a la implementación de los módulos se protegió la losa, aplicando una capa de impermeabilizante. Como base para unidades de

muestreo se construyeron 15 módulos de madera de 50 x 50 cm, para delimitar cada una de las unidades, dar soporte y contener el volumen de la tierra.

Figura 4. Proceso de construcción de los módulos experimentales.

a. Módulos base. **b.** Orificios con tubo PVC. **c.** Aplicación de plastico cement. **d.** Módulos impermeabilizados. **e.** Colocación de membrana impermeable. **f.** Colocación de PET (módulo testigo). **g.** Colocación de sustrato. **h.** Módulo con plantas (semi-intensivo**). i.** Módulo con pasto (extensivo).

Cada módulo cuenta con 40 cm de altura, 30 cm de la parte superior conforman un cajón abierto en el cual se implementaron los componentes que diferencian los tipos de módulos, este cajón cuenta con 4 orificios con tubos de PVC de media pulgada, cortados de 10 cm de longitud, colocados inclinados de adentro hacia afuera, en forma diagonal; los cuales tienen la función de drenar el exceso de agua; los módulos están sellados en la parte interior con plástico cement de la marca Fester, para evitar que se trasminé el agua de la parte superior a la inferior, y por fuera están impermeabilizados con pintura vinil acrílica premium para prevenir la penetración del agua a la madera.

Para la implementación de las unidades, primero se cortaron 10 cuadros de 50 x 50 cm de membrana impermeable; geomembrana de polietileno de alta densidad de 0.5 mm de grosor de la marca PASA, la cual tiene la función de evitar el paso del agua y las raíces a la parte inferior del cajón. Posteriormente sobre la membrana se colocaron las botellas de PET, las cuales previamente fueron aplastadas, y ayudan a que el agua se distribuya para así evitar su estancamiento y sirven también como protección anti raíz. Los 5 módulos testigo incluyeron hasta esta capa.

En el caso de los otros 10 módulos, sobre la capa de PET se colocó una capa de sustrato: tierra Vega, en los 5 módulos de tipo extensivo, la capa de tierra fue de 12 cm de profundidad y en los cinco de tipo semi- intensivo, la capa de tierra fue

de 20 cm de profundidad; la tierra provee los minerales y nutrientes necesarios para la vegetación.

Finalmente, para la elección de vegetación se tomó en cuenta la resistencia de las especies al clima de la ciudad. Para el caso de los tratamientos de tipo semi-intensivo, se consideraron especies utilizadas en jardinería porque está estandarizado su cultivo y mantenimiento; las especies que se sembraron fueron *Kalanchoe blossfeldiana* Poelln, 1934 y *Catharanthus roseus* G. Don, 1837.

Kalanchoe blossfeldiana del genero *Kalanchoe*, de la familia Crasulaceae, es una planta suculenta que puede alcanzar de 30 a 40 cm de altura y 20 cm de diámetro; es una especie que se cultiva todo el año, de fácil cuidado, tiene necesidades bajas de agua, tolera mejor la falta que el exceso de agua, se debe regar moderadamente permitiendo que el compost se seque ligeramente entre riego y riego, requiere de un ambiente luminoso y cálido, soporta bien ambientes secos, no soporta heladas ni temperaturas bajas (Van Voorst y Arends, 1982).

La segunda especie es *Catharanthus roseus* comúnmente llamada periwinkle Madagascar, del genero *Catharanthus*, familia Apocynaceae, es una planta herbácea verde que alcanza una altura de 1 m; esta especie se cultiva principalmente como planta ornamental, tiene una alta resistencia a condiciones secas y a la deficiencia de nutrientes, tiene un periodo de floración prolongado, todo el año en condiciones tropicales, prefiere pleno sol y suelo bien drenado (CONABIO, 2009).

Las plantas fueron sembradas con un crecimiento previo de mínimo un mes y medio para tener sus raíces formadas; esta siembra consistió en realizar orificios al sustrato humedecido, del diámetro y profundidad de las raíces de la planta, para colocarla y fijarla con el sustrato extraído.

Para los tratamientos de tipo extensivo, lo más común es utilizar pastos silvestres ya que cubren toda la superficie de vegetación y no requieren mucha profundidad de sustrato, son buenos aislantes térmicos y purifican el aire; en este caso se utilizó *Stenotaphrum secundatum* Walter y Kuntze, 1891, comúnmente llamado pasto de San Agustín. Esta especie es de fácil mantenimiento, tolerante a la sequía y al sol directo, no tolera las heladas ni las bajas temperaturas, prefiere los sitios húmedos, y se recomienda regar de dos a tres veces por semana (PIER, 2011).

Los 10 cm de la parte inferior de los módulos, forman un cajón cerrado con un pequeño orificio (con tapón), por el cual se introdujo el termómetro hasta el punto intermedio para la toma de temperaturas (Figura 5). Las unidades experimentales que conforman el sistema modular (Figura 6) se distribuyeron de forma aleatoria en la azotea de la casa habitación, como se muestra en el croquis (Figura 7), y los 5 módulos de tipo extensivo y las 5 de tipo semi- intensivo fueron regados cada tercer día por la noche; su toma de temperaturas se llevó a cabo durante todo un

año de abril del 2017 a marzo del 2018, cada tercer día, tres veces al día, al amanecer 8:00 am, a mediodía 2:00 pm y al atardecer 8:00 pm, utilizando un termómetro de laboratorio marca Brannan, que tiene un rango de temperatura de –20 º C a 50 º C.

Figura 5. Toma de temperaturas.

Figura 6. Sistema modular.

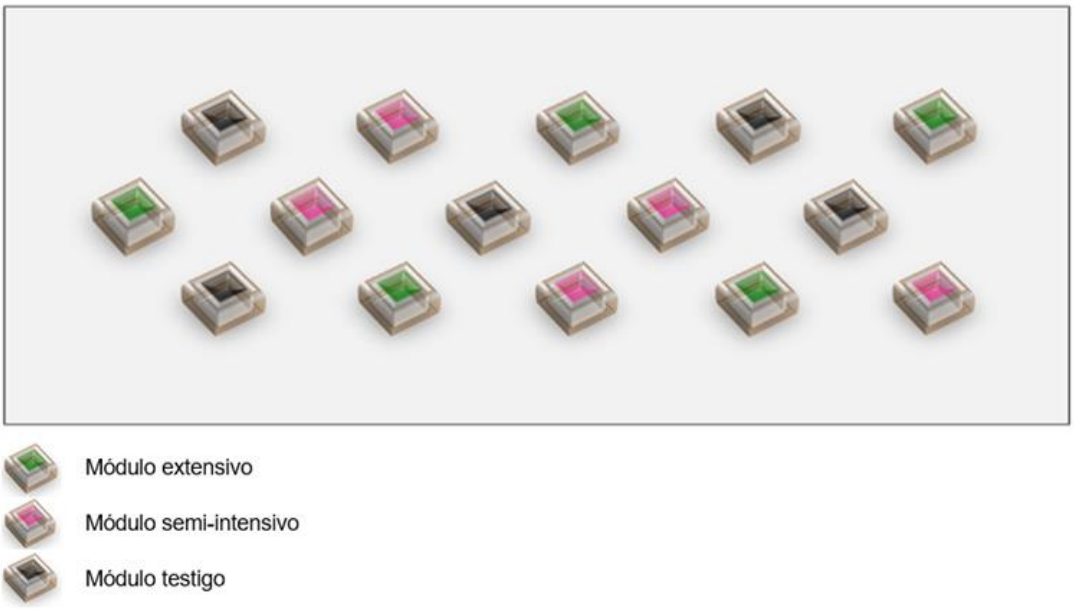

Figura 7. Distribución de las unidades.

5.2 Análisis de datos

Se tomaron y registraron las temperaturas de los tres tipos de módulos (Factor A) durante un año (abril 2017 a marzo 2018), en los 3 horarios establecidos (Factor C), y los valores se incluyeron en una base de datos elaborada en Excel, en la cual se consideraron cuatro temporadas climáticas (Factor B) presentes en la ciudad: la seca fría (1) que considera los meses de enero, febrero y marzo, la cálido seca (2) que abarca los meses de abril y mayo, la cálido húmeda (3) que predomina en la ciudad, en los meses de junio, julio, agosto, septiembre y octubre y finalmente la fría húmeda (4) que corresponde a noviembre y diciembre (Climate-Data.org, 2018; SMN, 2018).

Para el análisis de datos se aplicó una prueba de normalidad “Shapiro Wilk” con la cual se corroboro su comportamiento normal, y se procedió a realizar un análisis de varianza “ANOVA” factorial de 3 x 3 x 4, con un nivel de confianza del 95%, que incluyo los tipos de módulos, temporadas y horarios; dado que el análisis de varianza mostro diferencias significativas, se hizo una prueba de Tukey. Ambos análisis fueron realizados con el programa JPM (8.02, SAS Institute).

5.3 Análisis del comportamiento térmico, beneficios y costos

Finalmente, se evaluó y comparo el comportamiento térmico que tuvieron los diferentes tratamientos, todos sus costos asociados, y sus beneficios cualitativos.

VI. RESULTADOS

6.1 Diferencias térmicas entre los tratamientos

En el análisis de varianza se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos, temporadas y horarios, siendo el valor de p= < .0001* en todos los casos (cuadro 1).

Cuadro 1. Anova de factores A, B y C.

Factores	**Valor de F**	**P**
Tipo de modulo	17.1524	<.0001*
Temporada	537.2830	<.0001*
Horario	831.8022	<.0001*
Tipo de modulo *temporada*horario	1.4425	0.1387

Tipo de modulo *temporada	14.1913	<.0001*
Temporada*horario	10.2518	<.0001*
Tipo de modulo*horario	25.7501	<.0001*

En el análisis de comparación de medias (Tukey), se encontró que los tratamientos tanto extensivo como semi intensivo mostraron temperaturas muy similares entre sí, y ambos tratamientos difieren del testigo que mantiene temperaturas equivalentes a la temperatura ambiente.

Se encontraron variaciones entre las temperaturas de los tratamientos, de acuerdo a las temporadas, particularmente entre las cálidas y frías. En el caso de las temporadas fuertes que son las cálidas, los tratamientos con vegetación presentaron disminuciones de hasta más de 4 °C, siendo más notorias en el tratamiento extensivo y en el horario de las 2:00 pm, respecto al testigo., mientras en los horarios de la mañana y la noche las temperaturas de los tres tratamientos se mantuvieron similares (Figuras 8 y 9).

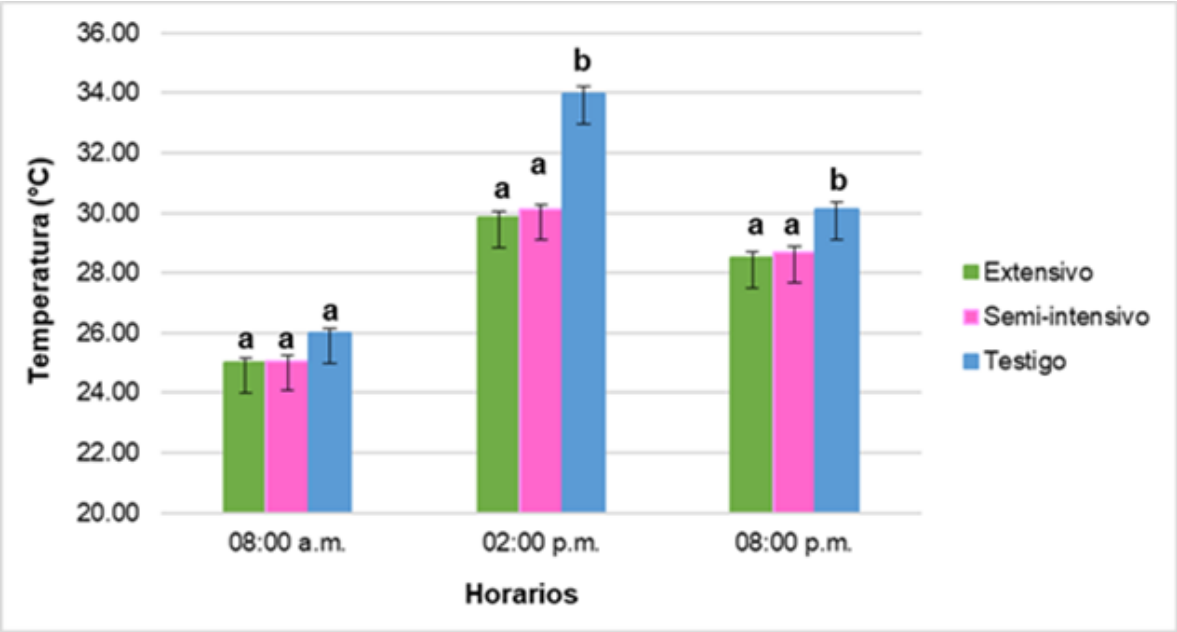

Figura 8. Temperaturas promedio por tipo de módulo en la temporada cálido- seca (abril- mayo).

*Las letras sobre las barras indican diferencias significativas entre tratamientos.

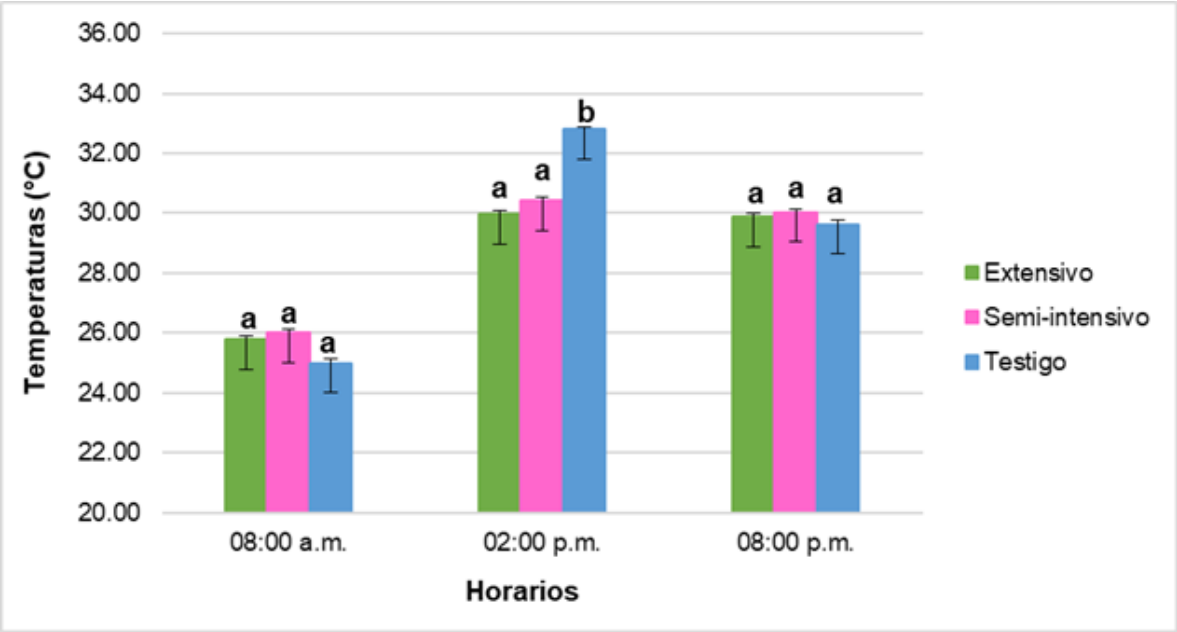

Figura 9. Temperaturas promedio por tipo de módulo en la temporada cálido-húmeda (junio-octubre).

Durante las temporadas frías, los tratamientos semi intensivos y extensivos presentaron ligeros aumentos en sus temperaturas de menos de 2 °C, particularmente el tratamiento semi intensivo, y en los horarios de en la mañana y la noche, presentando una diferencia más importante, de 2 °C, durante la temporada fría seca, con respecto a los tratamientos extensivo y testigo (Figuras 10 y 11).

Cabe mencionar que los efectos de los tratamientos durante las temporadas cálidas y frías fueron más pronunciados en las épocas secas.

Durante las temporadas cálido-húmeda y fría-húmeda en las cuales se presentaron lluvias, los módulos con vegetación mostraron un comportamiento estable respecto a diferencia de las temporadas secas, al tener comportamientos similares que corresponden a aumentos por la mañana, disminuciones al mediodía, y aumentos por la noche, sin embargo, estos efectos se vieron intensificados en la temporada cálido-húmeda. Por el contrario, en las temporadas secas, los módulos con vegetación presentaron gran variación de acuerdo a los horarios y temporadas.

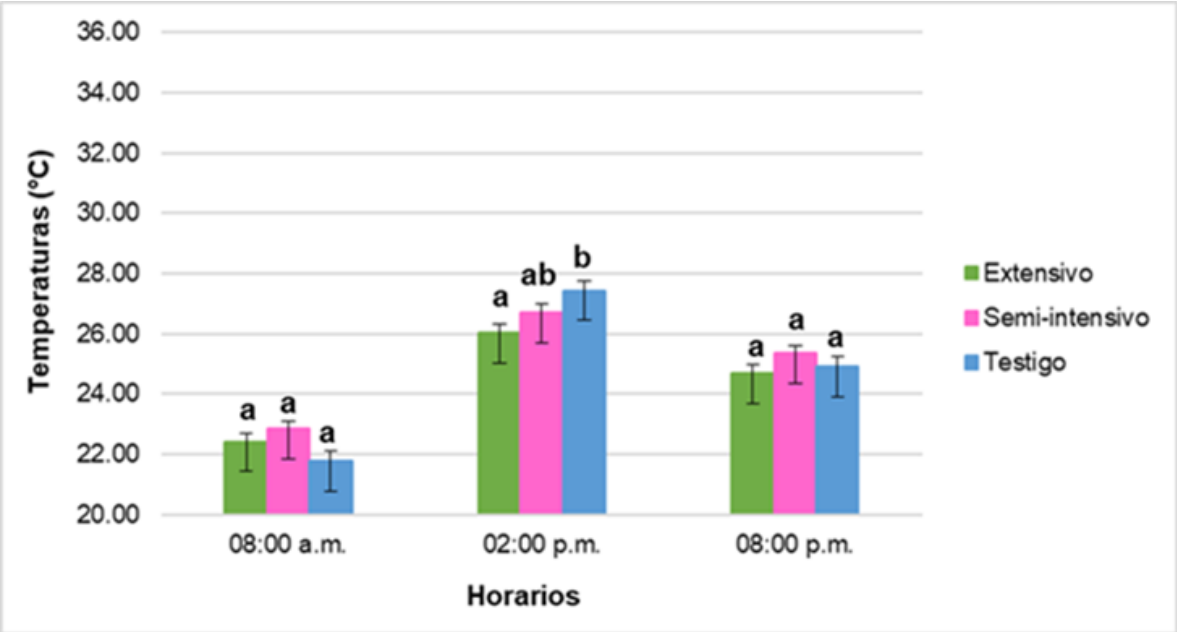

Figura 10. Temperaturas promedio por tipo de módulo en la temporada fría- húmeda (noviembre-diciembre).

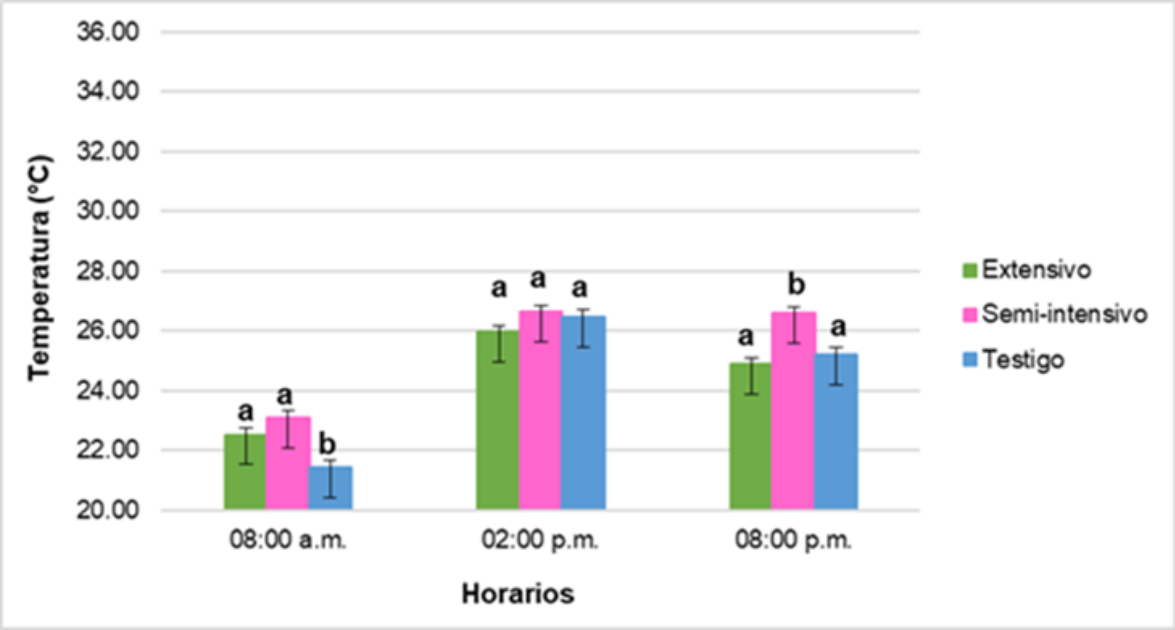

Figura 11. Temperaturas promedio por tipo de módulo en la temporada fría- seca (enero- marzo).

En el analisis de la variación de las temperaturas promedio por módulo, se observa el comportamiento de las temperaturas por temporada, en el cual se destaca que a las 8:00 am se registran las temperaturas mas bajas, posteriormente a las 2:00 pm se presenta un pico, y en el horario de las 8:00 pm vuelven a bajar un poco, este comportamiento se ve en las cuatro temporadas, en los tres casos (Figuras 12, 13 y 14).

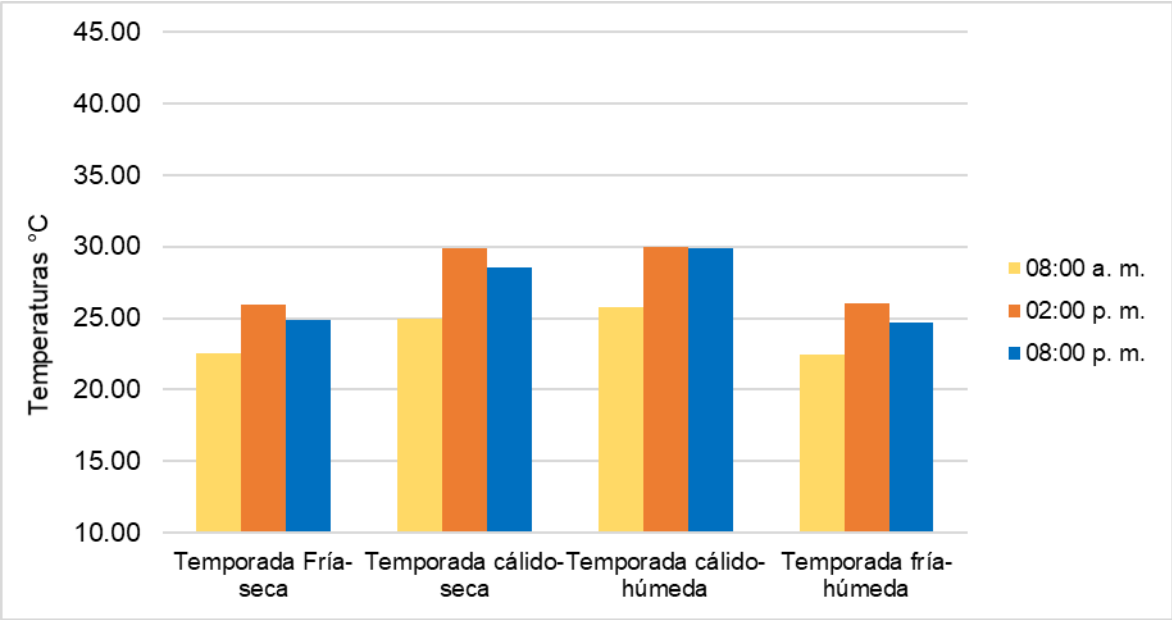

Figura 12. Temperatura promedio de módulo extensivo durante un año.

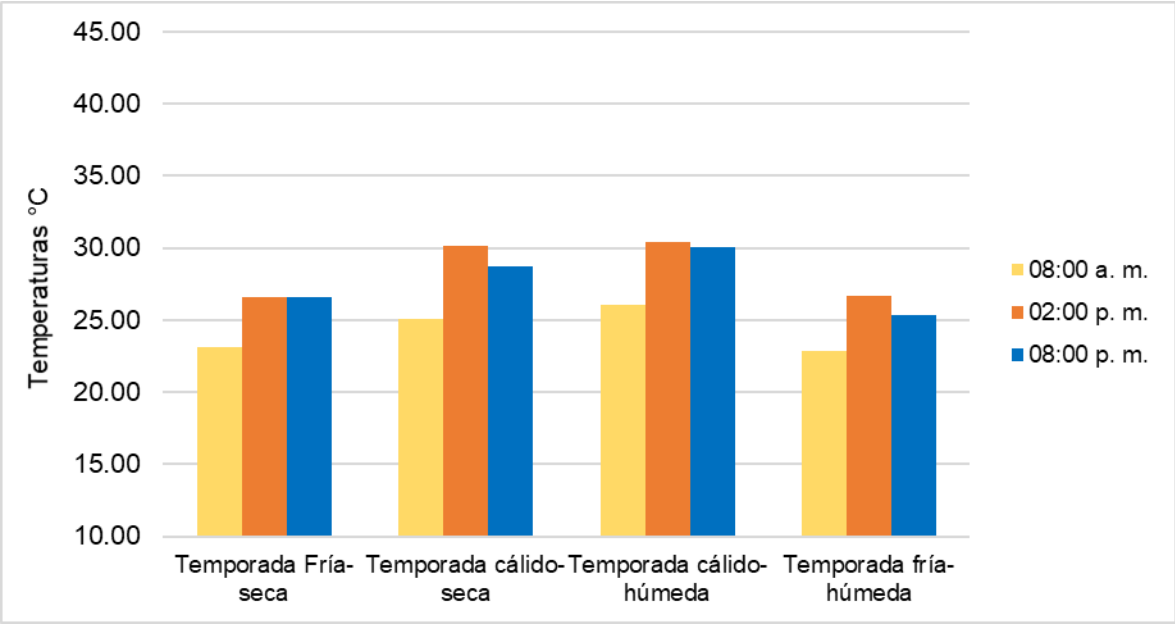

Figura 13. Temperatura promedio de módulo semi-intensivo durante un año.

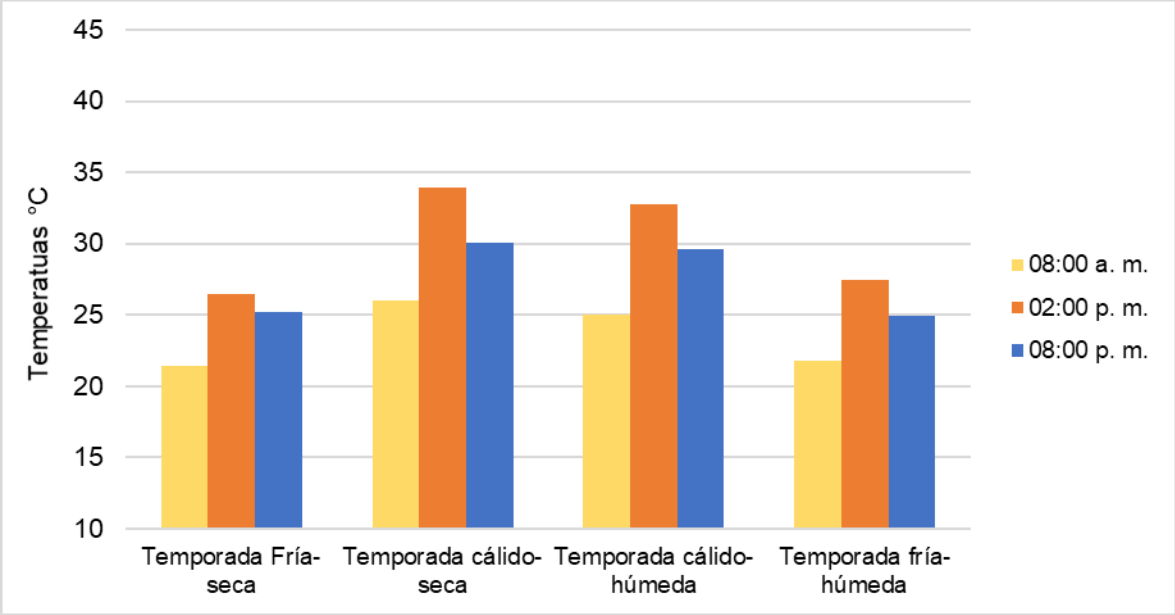

Figura 14. Temperatura promedio de módulo testigo durante un año.

6.2 Costos de implementación y mantenimiento

Se determinaron los costos de implementación del sistema modular y de cada tratamiento, considerando en todos los casos los materiales requeridos, la mano de obra y el mantenimiento (riego) durante un año, que fue de $512.40 el cual incluye el cálculo de los litros de agua, en el que se consideraron 4,270 litros utilizados al año, que se obtuvieron al multiplicar 35 litros de agua utilizados cada tercer día (3.5 litros x 10 módulos), por 122 días de riego al año, considerando también el precio por litro de agua en Poza Rica, que es de 0.12 pesos.

El costo general del proyecto fue de $7,568.65 pesos (Cuadro 2), en el que se incluyen los cinco tratamientos extensivos, cinco semi intensivos y cinco testigos, estos últimos incluyen todos los componentes excepto el sustrato y vegetación.

Cuadro 2. Costos del proyecto general.

COSTOS DEL PROYECTO (15 MODULOS)				
Material	**Unidad de medida**	**Cantidad total**	**Costo unitario**	**Costo total**
Tarimas de madera	Pieza	22.5	$40.00	$900.00
Tablas de madera	Pieza	30	$45.00	$1,350.00
Impermeabilizante (Berel)	Litros	7.5	$55.00	$412.50
Plástico cement (Fester)	Litros	22.5	$22.05	$506.25
Tubos de pvc (-½ pulgada)	Metros	6	$5.00	$30.00
Pintura vinil –acrílica	Litros	6	$120.00	$720.00
Membrana impermeable (PASA)	Metros cuadrados	7.5	$60.00	$450.00
PET	Kilogramos	15	$8.00	$120.00
Tierra negra	Kilogramos	80	$2.25	$180.00
Pasto “San Agustín”	Metros cuadrados	2.5	$25.00	$62.50
Planta Madagascar	Pieza	10	$25.00	$250.00
Planta Kalanchoe	Pieza	20	$25.00	$500.00
Tapón	Pieza	15	$5.00	$75.00
Mano de obra		15	$100.00	$1,500.00
Mantenimiento (agua)	Litros	4,270	$0.12	$512.40
Total				$7,568.65

En el caso de los testigos el costo por módulo fue de $404.25 pesos (Cuadro 3), en cuanto a los tratamientos con vegetación, el extensivo tuvo un costo de $483.74 pesos (Cuadro 4) y el semi intensivo de $625.74 pesos (Cuadro 5), siendo el tipo extensivo más económico que el intensivo, por una diferencia de $130.00 pesos por unidad.

Cuadro 3. Costos de módulo testigo.

MODULO TESTIGO				
Material	**Unidad de medida**	**Cantidad**	**Costo unitario**	**Costo total**
Tarimas de madera	Pieza	1.5	$40.00	$60.00
Tablas de madera	Pieza	2	$45.00	$90.00
Impermeabilizante (Berel)	Litros	0.5	$55	$27.50
Plástico cement (Fester)	Litros	1.5	$22.5	$33.75
Tubos de pvc (-½ pulgada)	Metros	0.4	$5.00	$2.00
Pintura vinil –acrílica	Litros	0.4	$120.00	$48.00
Membrana impermeable (PASA)	Metros cuadrados	0.5	$60.00	$30.00
PET	Kilogramos	1	$8.00	$8.00
Tapón	Pieza	1	$5.00	$5.00
Mano de obra		1	$100.00	$100.00
Total				$404.25

Cuadro 4. Costo de módulo de tipo extensivo.

MODULO EXTENSIVO				
Material	**Unidad de medida**	**Cantidad**	**Costo unitario**	**Costo total**
Tarimas de madera	Pieza	1.5	$40.00	$60.00
Tablas de madera	Pieza	2	$45.00	$90.00
Impermeabilizante (Berel)	Litros	0.5	$55	$27.50
Plástico cement (Fester)	Litros	1.5	$22.5	$33.75
Tubos de pvc (-½ pulgada)	Metros	0.4	$5	$2.00
Pintura vinil –acrílica	Litros	0.4	$120.00	$48.00
Membrana impermeable (PASA)	Metros cuadrados	0.5	$60.00	$30.00
PET	Kilogramos	1	$8.00	$8.00
Tierra negra	Kilogramos	7	$2.25	$15.75
Pasto “San Agustín”	Metros cuadrados	0.5	$25.00	$12.50
Tapón	Pieza	1	$5.00	$5.00
Mano de obra		1	$100.00	$100.00
Mantenimiento (agua)	Litros	427	$0.12	$51.24
Total				$483.74

Cuadro 5. Costos de módulo de tipo semi-Intensivo.

MODULO SEMI-INTENSIVO				
Material	**Unidad de medida**	**Cantidad**	**Costo unitario**	**Costo total**
Tarimas de madera	Pieza	1.5	$40.00	$60.00
Tablas de madera	Pieza	2	$45.00	$90.00
Impermeabilizante (Berel)	Litros	0.5	$55	$27.50
Plástico cement (Fester)	Litros	1.5	$22.5	$33.75
Tubos de pvc (-½ pulgada)	Metros	0.4	$5.00	$2.00
Pintura vinil –acrílica	Litros	0.4	$120.00	$48.00
Membrana impermeable (PASA)	Metros cuadrados	0.5	$60.00	$30.00
PET	Kilogramos	1	$8.00	$8.00
Tierra negra	Kilogramos	9	$2.25	$20.25
Planta Madagascar	Pieza	2	$25.00	$50.00
Planta Kalanchoe	Pieza	4	$25.00	$100.00
Tapón	Pieza	1	$5.00	$5.00
Mano de obra		1	$100.00	$100.00
Mantenimiento (agua)	Litros	427	$0.12	$51.24
Total				$625.74

6.3 Extrapolación de costos

Derivado de los costos obtenidos, se hizo una extrapolación proyectada a un año, de la implementación y mantenimiento de los tratamientos extensivo y semi intensivo por m^2, considerando la utilización de las mismas especies que en este proyecto, en sistema modular considerando módulos de 1 m^2 y 1 m de espacio entre cada módulo, y en sistema tradicional (cuadro 6). Los sistemas tradicionales no incluyen el costo de los contenedores de madera.

Cuadro 6. Proyección de costos según superficie y cubierta.

Costos por m^2 cubiertos				
Superficie	**Extensivo modular**	**Extensivo tradicional**	**Semi-intensivo modular**	**Semi-intensivo tradicional**
1 m^2	$967.48 (1)	$489.98	$1,251.48 (1)	$773.98
10 m^2	$7,256.1 (7.5)	$4,899.8	$12,514.8	$7,739.8
15 m^2	$10,884.15 (11.25)	$7,349.7	$14,079.15 (11.25)	$11,609.7
20 m^2	$14,512.2 (15)	$9,799.6	$ 18,772.2 (15)	$15,479.6

* Entre paréntesis se indica el número de módulos requeridos para cubrir el área respectiva.

De acuerdo al área, el tratamiento más económico es el extensivo tradicional y el más costoso es el semi intensivo modular.

VII. DISCUSIÓN

7.1 Diseño e instalación de techos verdes

Para el estudio de los efectos térmicos de los techos verdes en el presente trabajo, se diseñó e instaló un sistema modular que incluyo cinco réplicas de tres diferentes tratamientos. Estos sistemas tienen beneficios como que permiten incluir diferentes componentes dentro de un modelo, facilitando su estudio y la comparación de sus efectos, y tener un ambiente controlado para la instrumentación, lo que ha sido una técnica efectiva también para autores como Ferrans (2016), en su evaluación de la capacidad de retención de escorrentía pluvial de techos verdes modulares.

Carpenter (2008), en su informe de techos verdes, muestra que los sistemas modulares presentan grandes ventajas como que se pueden desmontar, lo que permite que su mantenimiento y reparación sea más fácil; se pueden plantar y/o ensamblar fuera del sitio y ser transportados e instalados de manera rápida y practica y menciona que, debido a esto, se usan con mayor frecuencia en aplicaciones extensas de cubiertas verdes; el sistema modular implementado en el presente trabajo brindo esos mismos beneficios, con la ventaja también de haber requerido menos 1 m^2 de recubrimiento para la misma área, aunque, en estos casos se podría considerar algún costo adicional de material como por ejemplo los contenedores.

Marchena (2012), recomendó utilizar PET reciclado en la implementación de techos verdes, debido a que es un material que permite reducir el espesor y peso de las capas superiores, además de ser considerado aislante y resistente a las raíces de las plantas y a la corrosión, y menciona también que al ser un material reutilizado, permite mantener los beneficios ambientales; en el presente estudio se utilizó este material como protección anti-raíz y para evitar el estancamiento de agua, por ser un material liviano y duradero que se consigue a bajo costo; y posiblemente haya ayudado a tener un control de temperatura, al ser un buen aislante

Los componentes utilizados en la implementación de los techos verdes han demostrado influir en los efectos que presenten estos sistemas. Los efectos térmicos positivos obtenidos en el presente trabajo pueden deberse a la utilización de ciertos materiales como el sustrato que fue tierra negra. Del Ángel (2013) demostró en su comparación de techos verdes compuestos por diferentes materiales, que los módulos que contenían tierra negra como sustrato, lograron una mayor reducción en sus temperaturas, respecto a los que contenían otro tipo de sustratos.

La vegetación utilizada para los módulos semi-intensivos fueron dos especies comúnmente utilizadas en jardinería, *Kalanchoe blossfeldiana* y *Catharanthus roseus*, que se eligieron por ser de fácil mantenimiento y tener un costo accesible. Sin embargo, son especies introducidas nativas de Madagascar, que tienen potencial invasor; debido a que en el presente trabajo se utilizó un sistema

modular esto no tuvo consecuencias, no obstante, en un sistema tradicional estas especies pudieran tener impactos negativos sobre la biodiversidad local. Bolaños-Silva y Moscoso-Hurtado (2011) proponen el uso de una matriz que concentra información para la selección asertiva de especies en envolventes vegetales, y recomiendan elegir con prioridad especies nativas, para evitar impactos negativos.

Para los módulos extensivos se empleó pasto San Agustín, y resultaron ser más efectivos que los semi-intensivos, lo que se pudiera atribuir meramente a los efectos que tiene la composición de las diferentes especies vegetales en el rendimiento y funcionamiento de los techos verdes. Lundholm *et al.* (2010) estudiaron los efectos de diferentes especies de plantas en las funciones de un techo verde y determinaron que los pastos, las hierbas altas y las suculentas pueden beneficiar la estabilidad y servicios ecosistémicos que brindan los techos verdes, como el enfriamiento en verano y la captura de agua, sugiriendo la utilización de estas especies.

7.2 Análisis de los efectos térmicos del sistema modular

Los tratamientos, extensivo y semi intensivo tuvieron temperaturas muy similares entre sí. Sin embargo, comparados con el testigo mostraron un mayor efecto térmico, esto concuerda con el estudio de Ordóñez y Pérez (2015) en el cual determinaron, en un clima cálido sub- húmedo en Mérida Yucatán, que los techos verdes de tipo extensivo tienen una mejor capacidad para reducir las fluctuaciones

térmicas, mostrando condiciones más homogéneas de temperatura, comparado a los techos blancos, que utilizaron como área de referencia.

Se observó también, que los efectos térmicos de ambos tratamientos difieren de acuerdo a las temporadas y horarios, presentando disminuciones de más de 4 C° grados en los meses cálidos, particularmente al mediodía, y teniendo un efecto contrario en los meses fríos, al presentar aumentos en sus temperaturas por la mañana y la noche, sin embargo, estos no fueron significativos.

Pérez (2017), en su estudio de la respuesta térmica frente al frío y calor, de 3 células con vegetación en la cubierta y 4 controles, en un clima cálido durante un año, encontró que las células con vegetación presentan más resistencia a las variaciones de temperaturas diarias, temperaturas 2 °C menores, en temporadas de calor y 1 °C mayores en temporadas de frío, respecto a los testigos, siendo capaces de mantener condiciones internas más placenteras en las diferentes temporadas del año. Sin embargo, como en el presente trabajo, presentaron menores efectos durante de las primeras horas del día, los cuales no difirieron mucho de los controles.

Martínez (2012), quien implemento y monitoreo un techo verde de tipo extensivo en la ciudad de Poza Rica, durante los meses de abril y mayo que corresponden a la temporada cálido- seca, obtuvo también resultados benéficos, al registrar disminuciones de temperatura de hasta 5 °C, respecto a los de una azotea convencional utilizada con testigo, lo que es similar a lo encontrado en el presente

trabajo, en donde, durante esa misma temporada se encontraron disminuciones importantes, y particularmente en los módulos de tipo extensivo fueron de hasta 4.32 °C.

El tratamiento extensivo tuvo un mayor efecto térmico durante los meses cálidos del año, al propiciar una mayor reducción en su temperatura, presentando un efecto mínimo en la temporada fría- seca, lo que coincide con Flores (2013) quien, en ese mismo periodo, obtuvo diferencias de 0.18 °C y 0.74 °C, en dos techos extensivos en la ciudad de Poza Rica.

Silva (2014) mediante un análisis de sensibilidad de un modelo de techos verdes, determinó que, a mayor altura de las plantas, se maximiza el efecto de aislamiento térmico, lo que se podría interpretar como una similitud con el presente trabajo, en donde, el tratamiento semi-intensivo, que presenta esa misma característica, tuvo un mayor efecto térmico en temporadas de frío, en comparación al extensivo.

7.3 Costos del sistema y extrapolaciones

La utilización de un sistema de cobertura vegetal supone en todos los casos un costo extra de inversión sobre un techo tradicional; éste factor económico es determinante para aceptar la implementación de estos sistemas. Si no se cuenta con datos de los costos y ahorros que se generan por los beneficios de la instalación de una cubierta verde, la viabilidad de su implementación es muy baja, como se determinó en el proyecto de Zielinski, García y Vega (2012), en donde debido a la falta de datos precisos, se descartó la propuesta de utilizar techos

verdes como una herramienta para la gestión ambiental en un importante sector hotelero en Colombia.

Para evitar que los costos del sistema de techo verde implementado en el presente trabajo fueran muy elevados, se optó por cubiertas de bajo mantenimiento, con espesores de sustrato reducido y se utilizaron materiales disponibles en la ciudad y de costo accesible. Además de incluir especies resistentes a las condiciones climáticas del lugar; como recomendaron también Giobellina *et al.* (2016) en su investigación sobre la implementación de techos verdes, como estrategia de control térmico, para techos convencionales, en Córdoba, Argentina.

En el presente proyecto se consideraron desde la planificación y diseño, los costos del sistema modular de un año, en los cuales se encuentran implícitos los precios de los materiales, la instalación y mantenimiento de cada tratamiento, resultando $142 más económico el modulo extensivo, respecto al semi-intensivo. Esto coincide con Ibáñez (2008), quien afirma que las cubiertas de este tipo tienen costos mucho más bajos respecto a las intensivas, además de tener menores requerimientos de construcción, lo que hace que sean fácilmente replicables.

Así mismo se evaluaron también los costos por área de sistemas tradicionales y modulares, resultando más económicos los tradicionales, en embargo el uso de sistemas modulares ha incrementado en los últimos años, debido a las ventajas

que ofrecen y la facilidad de su instalación y mantenimiento, que los hacen más prácticos.

7.4 Beneficios de los techos verdes

Uno de los principales beneficios que aporta la implementación de un techo verde es la regulación térmica, que puede propiciar una disminución en consumo energético, sobre todo por el uso de sistemas de climatización. Esto es similar a lo encontrado por Valbuena y Tibasosa (2016) quienes sugieren que el amortiguamiento de temperaturas es el beneficio más importante que aporta el uso de estos sistemas verdes, ellos además calcularon otros ahorros económicos como el consumo de agua y ahorro en emisiones de CO^2, obteniendo un retorno de inversión positivo.

Los beneficios tanto cualitativos como cuantitativos que pueden brindar los techos verdes varían considerablemente, de acuerdo al sistema que se utilice y el lugar en que se aprovechen. Bubalo *et al*. (2015) demostraron que los beneficios de cada ciudad dependen de la proporción de superficies impermeables y la densidad de población, por lo que se requiere conocer las condiciones específicas de cada lugar para identificar el sistema más adecuado y eficiente.

Los techos verdes han demostrado brindar beneficios económicos, sociales y ambientales, el sistema modular evaluado en el presente trabajo, presento efectos térmicos favorecedores, logrando amortiguar las temperaturas de los techos verdes, lo que pudiera contribuir al confort térmico y ahorros energéticos en la

casa-habitación donde esta implementado; Doug *et al.* (2005), estimaron los beneficios que podría proporcionar el uso de techos verdes a nivel municipal y sus costos de implementación, considerando techos verdes instalados sobre espacios con sistemas de climatización (aires acondicionados), y encontraron como principal beneficio la reducción en el uso de energía, y otros como la reducción de islas de calor, mejoras en la calidad del aire y gestión de aguas pluviales.

En el presente estudio se encontraron también otros beneficios, de tipo ambiental, brindado por el sistema modular de techos verdes, siendo estos, que su presencia beneficia la estética de la azotea, además de ofrecer un pequeño hábitat para algunas especies de insectos. Esto mismo ha sido encontrado en trabajos como el de Victorio (2017), quien estimó la valoración económica y ambiental de los servicios públicos que ofrecen los techos verdes a los habitantes de una urbanización en Perú, obteniendo que la inclusión de estos sistemas logro mejorar la belleza paisajística de la urbanización, de acuerdo a la percepción del 97% de los habitantes, además de una mejoría en su conocimiento sobre la importancia de contar con estas áreas verdes y conservarlas.

Los beneficios privados que puede brindar el uso de un techo verde son el aumento en el valor y la utilidad de la azotea de la propiedad, la generación de un espacio que propicia relajación, y el incremento de zonas verdes en la ciudad. Díaz, (2015) realizó una cuantificación de los beneficios privados y públicos del uso de estos sistemas, en relación a los costos de construcción y mantenimiento, y estimo que los techos verdes aumentan el valor de una propiedad en un 4.12%

por metro cuadrado, que los beneficios privados son mayores a los costos, y que el conocimiento de los techos verdes por parte de los residentes, es determinante para su valoración y la disposición a pagarlos.

Si se quiere dar una mayor utilidad a las azoteas con techos verdes, se pueden emplear como huertos para cosechar hortalizas, para lo cual son muy útiles los sistemas modulares. Kasten-Paredes (2016) implementó y analizó un sistema modular de azotea verde sustentable con cultivo de hortalizas, determinando su factibilidad, y afirma que el cultivo en los techos verdes representa la obtención de hortalizas de alta calidad, producidas con un mínimo esfuerzo de atención personal y bajo costo, que además disminuye el gasto familiar, y su comercialización contribuye a generar ingresos.

Victorio (2017) afirma que la cosecha de hortalizas en techos vegetales de viviendas, retribuyen aproximadamente en un 38% sus costos de inversión, por su venta, en un periodo de 60 días. Cortés y Castillo (2012), evaluaron tres sistemas productivos de hortalizas techos de viviendas, encontraron que estos sistemas favorecen la seguridad alimentaria, permitiendo cubrir el 100% de la dieta en hortalizas de una a tres personas diariamente, y que las ganancias por la venta de hortalizas pueden superar el salario mínimo, en promedio un 29%, y representar un ingreso complementario a una familia, además de brindar ganancias por mano de obra; confirmando los beneficios económicos que brinda esta modalidad de los techos verdes.

El uso techos verdes puede representar también una solución al déficit de espacios verdes en las ciudades y las problemáticas ambientales que la remoción de estas ocasiona, debido a las múltiples ventajas que ofrecen. Hoyos (2014) encontró que estas cubiertas vegetales son un sistema constructivo muy benéfico para el medio ambiente, que por su aplicación constructiva y viabilidad son muy efectivas en las áreas metropolitas, que, además, requieren de componentes accesibles y fáciles de conseguir.

VIII. CONCLUSIONES

En la evaluación de los tres tipos de módulos implementados se encontraron diferencias térmicas importantes en función de la composición de cada uno, las diferentes temporadas del año y horas del día. De acuerdo a los resultados obtenidos, podemos concluir que los módulos que contienen sustrato y vegetacion tuvieron un efecto térmico favorecedor particularmente al mediodía durante las dos temporadas cálidas.

En la comparacion del comportamiento térmico y los costos de los tipos de modulos, los de vegetacion de tipo extensiva lograron mayores reducciones en temperaturas para las temporadas calidas, que predominan en la ciudad, ademas de ser mas economicos que los de tipo semi- intensivo.

Debido a su cobertura y la sombra que aportan, los techos verdes son tratamientos que pueden contribuir a la reduccion del calentamiento de las azoteas, ademas de las ventajas cualitativas ambientales que proveen como la reduccion del calentamiento urbano, su aporte de valor estetico, su contribucion a la minimizacion de la huella ambiental, su contribucion al desarrollo de habitats naturales, y beneficios a la salud humana y ambiental.

Sus beneficios cuantitativos pueden variar considerablemente de un lugar a otro, debido a sus características y los diferentes contextos que se pueden documentar, debido a esto, es importante estudiar cada caso particular y considerar la utilización de estos sistemas como técnicas de climatización natural en las casas

habitación, para complementar y contribuir a la reduccion del uso de energia por sistemas de climatización, ademas de influir en la minización de problemas ambientales relacionados con el consumo excesivo de energía, la contaminación auditiva, las emisiones de CO^2, y contribuir así, a mejorar la calidad de vida de los habitantes. Esta información puede ser considerada para un beneficio adicional como lo es la reducción en el consumo energético (anexo 3).

IX. RECOMENDACIONES

Se deben contemplar estudios que permitan identificar cuales son las especies de vegetación más resistentes a las temporadas climáticas de la ciudad de Poza Rica, y determinar sus rendimientos para asegurar que aporten mayores beneficios térmicos.

Considerar el uso de otro tipo de materiales más económicos, para la construcción de los contenedores de los sistemas modulares y probarlos a nivel experimental.

Las investigaciones futuras podrían enfocarse a valorizar los beneficios publicos que brindan los techos verdes, como el aumento de biodiversidad, la mejora del paisaje, la reducción de islas de calor, de emisiones de contaminantes y minización de escorrentia.

Tomar en cuenta la incoporación de techos verdes como técnicas de sombreado en las casas habitación, lo que favorecerá el confort térmico y el ahorro de energía.

El trabajo puede servir para extrapolarse a varias areas, ya que si bien los tratamientos se establecen como módulos, en el momento en que se cubra un area completa, se podría lograr tambien un decremento significativo de la temperatura.

X. APLICACIÓN PRACTICA

Este sistema modular de techos verdes puede ser empleado fácilmente, sus requerimientos de materiales, instalación y mantenimiento se encuentran al alcance de un gran número de personas tanto físicas como morales. Las ventajas que tiene la utilización de techos verdes, pueden directamente beneficiar a personas con intenciones de mejorar el confort térmico de una casa- habitación o un edificio, aumentar la plusvalía de un inmueble, aportar valor estético, incluir una enotecnia, o practicar la construcción sustentable, así mismo, la comercialización de techos verdes representa una fuente de ingresos para quien la lleva a cabo.

XI. BIBLIOGRAFÍA

Alpuche, M.G., Moreno, H., Ochoa, J.M. y Marinic, I. 2010. Análisis térmico de viviendas económicas en México utilizando techos verdes. Departamento de Arquitectura y Urbanismo, 3 (3): 59-67.

Arif, M.K. 2010. “A study of shading of buildings as a preventive measure for passive cooling and energy conservation in buildings.” International Journal of Civil & Environmental Engineering, 10 (6): 19-22.

Arregui, H.L.J. 2016. El futuro de los techos verdes en la ciudad de Buenos Aires. Tesis (Monografía) de Ingeniería. Universidad Católica Argentina, Buenos Aires, Argentina.

Barahona, S.T. 2011. Evaluación de techos verdes como agentes ahorradores de energía en México. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

Bolaños-Silva, T., y Moscoso-Hurtado, A. 2011. Consideraciones y selección de especies vegetales para su implementación en ecoenvolventes arquitectónicos: una herramienta metodológica. Nodo: Arquitectura. Ciudad. Medio Ambiente, 5 (10): 5- 20.

Breuste, J., Artmann, A., Wruster, D., Voigt, A., y Faggi, A. 2013. Espacios verdes urbanos, fortalezas, amenazas y oportunidades de mejora. Calidad de Vida y Salud, 6 (1): 59-70.

Bubalo, M., de Bruijn, K., Chubb, L., Mederake, L., y Bor, A. 2015. Valuing the Benefits of Green Roofs for the “Green Deal- Green Roofs” Municipalities. University of Amsterdam, Holanda. 25 pp.

Canales, M. 2014. Efectos del uso de techos verdes y fachadas vegetales en el comportamiento térmico de edificios. Tesis de Licenciatura. Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile.

Carpenter, S. 2008. Green roofs and vertical gardens. International Specialised Skills Institute, Melbourne, Australia. 41 pp.

Carpenter, S. 2014. Growing Green Guide: A guide to green roofs, walls and facades in Melbourne and Victoria. State of Victoria through the Departments of Environment and Primary Industries, Victoria, Australia. 131 pp.

Cheng, C.C., Pouffary, S., Svenningsen, N., Callaway, J.M. 2008. The Kyoto Protocol, The clean development mechanism and the building and construction sector: A report for the UNEP Sustainable Buildings and Construction Initiative, París, Francia. 84 pp.

Climate-Data.org: Datos climáticos mundiales. 2018. [Consultado abril, 2018]. Página electrónica (https://es.climate-data.org/location/4696/).

CONABIO: *Catharathus roseus*. 2009. [Consultado en diciembre 2016]. Página electrónica(http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/apocynaceae/catharanthus-roseus/fichas/ficha.htm)

Contreras, E. y Castillo, I. 2015. Guía de azoteas y cubiertas verdes. Ajuntament de Barcelona, Barcelona, España. 41 pp.

Cortés, C.F., y Castillo, C.A.D. 2012. Sistema productivo de techos verdes en comunidades vulnerables: estudio de caso en el barrio La Isla, Altos de Cazucá en Soacha, Cundinamarca. Ambiente y Desarrollo, 16 (30): 21- 35.

Díaz. J.C. 2015. Valoración económica de Techos Verdes en Bogotá. Tesis de Maestría. Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

Del Ángel, G. I. 2013. Comparativo entre materiales utilizados en azoteas verdes para disminuir la isla de calor en azoteas urbanas. Tesis de Licenciatura. Universidad Veracruzana, Poza Rica, México.

DOF (Diario Oficial de la Federación). 2011. [actualizado al 14 de diciembre]. Página electrónica (https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/181658/NOM_018_ENER_2011.pdf).

DOF (Diario Oficial de la Federación). 2011. [actualizado al 9 de agosto]. Página de internet (https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/181660/NOM_020_

ENER_2011.pdf).

Doug, B., Hitesh, D., James, L., y Paul, M. 2005. Report in the environmental benefits and costs of green roof technology for the city of Toronto. MPRA (Munich Personal RePEc Archive), Toronto, Canadá. 63 pp.

Duarte, D. y Moreno, A. 2014. Techos verdes en viviendas de estrato 1: aplicado a los barrios Yomasa. Tesis de Licenciatura. Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia.

Dvorak, b. 2009. The Chicago City Hall green roof pilot project: A case study, Texas A&M University, College Station, 1-8.

Feliz, S. K. 2016. Estudio de factibilidad de la implantación de techos verdes en un clima tropical como el de la Republica dominicana. Tesis de Maestría. Universitat Politécnica de Catalunya, Catalunya, España.

Ferrans, R.P. 2016. Evaluación experimental de la capacidad de retención y efectos en la calidad del agua de escorrentía pluvial de techos verdes modulares. Tesis de Maestría. Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

Flores, F.F. 2015. Techos verdes propuesta de mitigación de la isla de calor en la cuidad de Poza Rica, Veracruz. Tesis de Maestría. Universidad Veracruzana, Poza Rica, México.

García, V.I. (2010). Beneficios de los sistemas de naturación en las edificaciones. Páginas personales, México, UNAM, SNES2010-ABC022. [Consultado octubre, 2018]. Página electrónica (http://www.paginaspersonales.unam.mx/files/251/BENEFICIOS_SISTEMAS_NATURACION_ILSE.pdf).

Gavilanes, A. M. 2015. Techos verdes: prácticas de gestión ambiental en áreas urbanas. Tesis de Licenciatura. Pontifica universidad católica del ecuador, Quito, Ecuador.

Giobellina, B., Maristany, A., Angiolini, S., Pomazán, S., Celiz, Y., y Marquez, F. 2016. Rendimiento térmico de cubiertas verdes sobre el techo de chapa en la Ciudad de Córdoba- Argentina. In/Encuentro Nacional sobre Ciudad, Arquitectura y Construcción Sustentable, La Plata, Argentina. 11 pp.

Gonzáles Couret, D. y Gonzáles Pérez, L.G. 2016. Techos verdes apropiados para viviendas en la Habana. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba. 12 pp.

Grimoldi, E. 2009. Diseño y aplicación de techos verdes. Tesis de Licenciatura. Instituto Tecnológico de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.

Hoyos, G.R. 2015. Aplicación de las cubiertas verdes en el medio local como solución al déficit de zonas verdes en Medellín. Tesis de licenciatura. Universidad de Medellín, Medellín, Colombia.

Huovila, P. 2007. Buildings and climate change: status, challenges, and oportunities. United Nations Environment Programme, París, Francia. 38 pp.

Ibáñez, R.A. 2008. Techos vivos extensivos: una práctica sostenible por descubrir e investigar en Colombia. Revista Alarife: Revista de arquitectura, 16 (21): 22- 35.

Jiménez-López, V., García-Gómez, C., Bojórquez-Morales, G. 2013. Monitoreo térmico de módulo de techo verde en clima cálido húmedo. Universidad de Colima, Colima, México. 10 pp.

Kasten-Paredes, K. 2016. Atributos y criterios de diseño sustentable para el desarrollo de un módulo de azotea verde extensivo/mixto en Zapopan. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Occidente, Tlaquepaque, México.

Lagunes Vega, T. 2016. Amortiguamiento Térmico mediante la aplicación de sistemas pasivos de climatización sobre losas de azotea. Tesis de Maestría. Universidad Veracruzana, Poza Rica, México.

Liu, K., y Bass, B. 2005. Performance of green roof systems. National Research Council Canada, Report No. NRCC-47705, Toronto, Canada. 18 pp.

Lundholm, J., MacIvor, J.S., MacDougall, Z., y Ranalli, M. 2010. Plant species and functional group combinations affect green roof ecosystems functions. PloS one, 5 (3): e9677.

Maldonado, C. D. 2009. Efectividad de los sistemas de techos con cubierta vegetal para la mitigación del calentamiento y manejo de la escorrentía de las zonas urbanas. Tesis de Maestría. Universidad de San Juan, San Juan, Puerto Rico.

Marchena, A.D.C. 2012. Techos verdes como sistemas urbanos de drenaje sostenible. Tesis de Ingeniería. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

Martínez, P. E. 2012. Efecto del pasto san Agustín *(Stenotaphrum secundatum)* en la disminución de la isla de calor mediante las azoteas verdes en un aula. Tesis de Licenciatura. Universidad Veracruzana, Poza Rica, México.

Miguel, S. y Analia, F. 2016. Cubiertas verdes y jardines verticales. Sistemas constructivos que optimizan el control térmico de la envolvente edilicia. Rev. Avances en energías renovables y medio ambiente. 20 (9): 11-18.

Minke, G. 2009, Techos verdes planificación, ejecución, consejos prácticos. Ed. Fin de siglo, Kassel, Alemania. 86 pp.

Olyay, V. 2002. Interpretación climática. pp. 1-42. En: Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas. GG (ed.). Ed. Gustavo Gili, Barcelona, España.

Ordóñez, L.E.E y Pérez, S.M.M. 2015. Comparación del desempeño térmico de techos verdes y techos blancos mediante técnicas IR. Acta Universitaria, 25 (5): 11-19.

Osuna, M.I., Herrera, C.C., y López, B.O. 2017. Techo plantado como dispositivo de climatización pasiva en el trópico. Revista de Arquitectura. 19 (1): 42-55.

Pandey, S., Hindoliya, D.A. y Mod, R. 2013. Experimental investigation on Green roofs over buildings. International Journal of Low-Carbon Technologies. 8 (1): 37-42.

Pérez, G.N. 2017. Respuesta térmica de edificaciones con envolventes vegetales: cubiertas verdes y fachadas verdes. Tesis de Doctorado. Universidad de São Paulo, São Carlos, Brasil.

PIER (Pacific Island Ecosystems at Risk). 2011. [consultado en diciembre, 2016]. Página electrónica (http://www.hear.org/pier/species/stenotaphrum_secundatum.htm).

Ramírez, W.A y Bolaños-Silva, T. 2012. Revisión sobre el papel de los techos verdes en la remoción de carbono atmosférico en el neotrópico. Rev. Nodo. 12 (6): 7-18.

Rebolledo, P. H. 2011. Ahorro y uso eficiente de la energía: Alternativas para la reducción del consumo residencial en tarifas DAC. Boletín IIE Gestión del uso eficiente de la energía eléctrica, Breves técnicas, 35 (4): 169- 171.

Rocha, T. E. 2011. Construcciones sostenibles: materiales, certificaciones y LCA. Rev. Nodo. 6 (11): 99- 116.

Rodríguez, A.T. y Morillón, G.D. 2007. Evaluación del uso de techos verdes en clima templado: caso de Ecatepec de Morelos, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, 11 (5): 183-190.

Rosatto, H., Villalba, G., Rocca, C., Meyer M., Bargiela, M., Hashimoto P., Laureda, D., Pruzzo, L., Khoan, D., Cazorla., Plaza, L.R., Quaintenne, E., Barrera, D., Mazzeo, N., Gamboa, P. y Caso, C. 2013. Eficiencia en la retención del agua de lluvia de cubiertas vegetadas de tipo “extensivo e” intensivo”. Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. 45 (1): 169- 183.

Sánchez, M. I. 2012. Manual para el diseño e instalación de una azotea verde. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de México (UNAM), Cuidad de México, México.

SEDEMA (Secretaría de Medio Ambiente: Azoteas Verdes). 2011. [Consultado diciembre, 2016]. Página electrónica (http://www.sedema.cdmx.gob.mx/programas

/programa/azoteas-verdes).

SEGOB (Diario Oficial de la Federación). 2015. [Consultado noviembre, 2016]. Página electrónica (http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5394047&fecha=

28/05/2015).

Sika mexicana: El techo verde más grande de Latinoamérica. 2014. [Consultado octubre, 2016]. Página electrónica

(http://mex.sika.com/es/inicio/quienes-somos/obras-sika/techo-verde-infonavit.html).

Silva, F.D.R.M. 2014. Green roof energy simulation. Lisbon University, Lisboa, Portugal. 11 pp.

SMN (Servicio Meteorológico Nacional). 2018. [Consultado abril, 2018]. Página electrónica (http://smn.cna.gob.mx/es/informacion-climatologica-ver-estado?estado=ver).

Suavita, P.P.A. 2014. Techos verdes utilizados como elementos de regulación de la escorrentía en Bogotá. Tesis de Maestría. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

The home Depot International. 2018. [Consultado abril, 2018]. Página electrónica (https://www.homedepot.com.mx/comprar/es/la-paz/TipsDeCompra/tips-para-elegir-un-aire-acondicionado).

Trujillo, S.R., Rangel, M.Y. y Castañeda, N.G. 2015. Potencial del techo verde, para ahorrar electricidad por aire acondicionado en la edificación. Rev. Nova scientia. 7 (15): 577-596.

Valbuena. L.S y Tibasosa. B.A.P. 2016. “Estudio de pre-factibilidad técnica, ambiental y económica para la implementación de terrazas verdes en el centro empresarial La Castellana de Bogotá” Tesis de Licenciatura. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.

Van Voorst, A. y Arends J.C. 1982. The origin and chromosome numbers of cultivars of *Kalanchoe blossfeldiana* Von Poelln.:.their history and evolution. Rev Euphytica. 31: 573-584.

Victorio, T.C.M. 2017. Valoración económica y ambiental de los servicios que ofrecen los techos verdes a las familias de la urbanización el Pinar- Comas. Tesis de Ingeniería. Universidad César Vallejo, Lima, Perú.

Villa, F. 2009. Construcciones verdes, Rev. Alarife, Revista de arquitectura. (17):41-54.

Zielinski, S., García Collante, M.A., Vega Paternina, J., 2012. Techos verdes: ¿Una herramienta viable para la gestión ambiental en el sector hotelero del Rodadero, Santa Marta. Rev. Gestión y Ambiente, 15 (1): 91-104.

Anexo 1

Profundidad de sutrato según tipo de techo verde.

Los jardines en los techos tradicionales requieren un espesor de suelo considerable para cultivar plantas grandes y césped tradicional.

Los techos intensivos requieren de un espesor mínimo de 20 cm, tienen un peso en estado saturado mayor a los 200 k/m^2; demandan mantenimiento frecuente como riego, abono y otros cuidados; los techos intensivos son de tipo parque con fácil acceso y pueden incluir desde especias para la cocina, arbustos y árboles pequeños y grandes.

Los techos semi-intensivos requieren de un espesor de 15 cm, tienen un peso promedio de entre 150 y 250 kg/m^2 en estado saturado y demandan un mantenimiento regular de puro riego de 2 a 3 veces por semana.

Los techos "extensivos" requieren de un espesor de 8 a 12 cm, cuentan con un peso de entre 110 y 140 kg/m^2 en estado saturado y están diseñados para requerir un mínimo mantenimiento opcional que incluye desmalezar una vez al año o una aplicación de abono de acción lenta para estimular el crecimiento (Sánchez, 2012).

Anexo 2

Normatividad en materia de techos verdes en México.

Existen normas en el país, relacionadas con el uso de techos verdes y con el comportamiento y eficiencia térmica de los edificios, las primeras tienen el objetivo de impulsar la implementación de techos verdes, y las segundas incluyen especificaciones para la reducción de la ganancia de calor de la edificación a través de su envolvente, y racionalizar el uso de energía en los sistemas de enfriamiento; ambas normas buscan lograr confort térmico en el interior de las edificaciones considerando elementos del diseño bioclimático y la utilización de materiales adecuados a cada clima.

Estos ejes rectores en materia de eficiencia térmica son:

La NOM-018-ENER-1997: Aislantes Térmicos para Edificaciones- Especifica las características, límites y métodos de prueba para caracterizar los materiales aislantes para la construcción (DOF, 2011).

La Norma Oficial Mexicana NOM-020-ENER-2011: Eficiencia energética en edificaciones – Limita la ganancia de calor de los edificios para uso habitaciones a través de su envolvente, con objeto de racionalizar el uso de la energía en los sistemas de enfriamiento (DOF, 2011).

En cuanto al desarrollo de techos verdes en edificaciones, se consideran las siguientes normas:

La NADF-013-RNAT-2007 que establece las especificaciones técnicas para la instalación de cubiertas verdes en la ciudad de México, proporciona una descripción detallada de los componentes y requerimientos mínimos que debe cumplir (Gaceta oficial del Distrito Federal, 2008); y la NMX-AA-164-SCF1-2013 de Edificación Sustentable que especifica los criterios y requerimientos ambientales mínimos de una edificación sustentable, la cual recomienda la inclusión de azoteas verdes con el fin de ayudar a mejorar las condiciones ambientales de la edificación a través de generar sombras cuando se requiera, reducir los asoleamientos y permitir su paso cuando se requiera ganar calor (SEGOB, 2015).

La Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA) de la Ciudad de México a través de la dirección de Reforestación Urbana, Parques y Ciclo vías ha creado y colaborado con la implementación de múltiples techos verdes, además ha impulsado desde el 2007 la implementación de áreas verdes, específicamente techos verdes en diferentes tipos de edificaciones, con el fin de generar beneficios sociales y ambientales para la población mexicana, contribuyendo a que sea un país más sustentable.

La SEDEMA en coordinación con la Secretaría de Finanzas, brinda el beneficio de una reducción del 10% en el impuesto predial a las personas físicas que instalen azoteas verdes en sus inmuebles de uso habitacional, acreditando ser propietarios de estos; esto con el objeto de incrementar la superficie actual de las áreas verdes urbanas en la Ciudad de México (SEDEMA, 2011).

En el 2008, el Gobierno del Distrito Federal (GDF) puso en marcha el Programa de Certificación de Edificaciones Sustentables (PCES), con el fin de establecer un estándar para calificar los edificios, tanto habitacionales como comerciales y ofrecer una serie de incentivos fiscales, algunos de estos son descuentos en el impuesto predial, licencias de construcción, financiamientos a tasas preferenciales, rapidez en la ejecución de trámites; este programa aún sigue vigente.

Anexo 3

Los techos verdes y su efecto en el consumo energético.

Con el fin de hacer una comparación entre el amortiguamiento térmico del uso de los techos verdes y el uso de sistemas de climatización con este mismo fin, se hizo el siguiente análisis:

La capacidad de enfriamiento de los aires acondicionados se mide en BTU's (British Thermal Unit), esta medida se traduce en las toneladas de refrigeración que brinda determinado equipo, de acuerdo a la cantidad de calor que puede extraer de una habitación, y el tonelaje que se requiere para enfriar determinada área (habitación), calculada en m^2. Esta capacidad depende también de la zona climática en la que se utilice el sistema de aire acondicionado.

Primero se obtuvieron el Tonelaje y BTU´s que requieren los equipos de aire acondicionado frío/calor, para climatizar habitaciones de distintos tamaños, así como m^2 de techos verdes requeridos para cubrir las mismas áreas (cuadro 7), de acuerdo, a la zona climática tres, que es a la que pertenece el estado de Veracruz (The Home Depot International, 2018).

Cuadro 7. Capacidad de enfriamiento requerida por área.

Tonelaje y BTU/h por equipo y área			
Área de habitación	**Mini Split frío/calor**	**Inverter frío/calor**	**Cobertura de sistema de techo verde**
8 a 12 m^2	1 tonelada / 11,000 btu/h	1 tonelada/ 12,000 btu/h	8 a 12 m^2
12 a 20 m^2	1.5 toneladas / 17,000 btu/h	1.5 toneladas/ 18,000 btu/h	12 a 20 m^2
20 a 25 m^2	2 toneladas / 24,000 btu/h	2 toneladas/ 22,000 btu/h	20 a 25 m^2

*Estos datos pueden variar dependiendo del lugar en donde se instale, el tipo de ventilación que exista en la habitación, el flujo de personas y sobretodo el mantenimiento que se le brinde al equipo.

El consumo eléctrico es la cantidad de kilovatios (kW) que se emplean en un domicilio durante un periodo de tiempo y se puede calcular por cada aparato, en este caso se consideraron los aires acondicionados que se utilizan comúnmente como sistemas de enfriamiento, los equipos de tipo mini Split frío/calor y los de tipo Inverter frío/calor que se consideran ahorrativos, se contabilizo cuanta energía consume cada equipo para mantener una temperatura confortable en una habitación, durante un periodo de un año, en tres diferentes tonelajes y con un voltaje de 220 V.

La energía consumida por los artefactos, se determinó multiplicando la potencia que los aires acondicionados utilizan durante una hora, que son los kilovatios hora (kWh), los cuales se encuentran la etiqueta de especificaciones de los equipos, por la cantidad de horas que esta prendido el equipo al año (Inga, 2018) considerando cuatro temporadas presentes en Poza Rica y esto a su vez se multiplico por 0.95 que es el precio del kWh en un consumo intermedio, establecido por la CFE para la ciudad.

El cuadro 8 muestra el análisis comparativo de consumo energético de los aires acondicionados, considerando un tiempo de operación anual de los equipos de 4,380 horas, que corresponden a 12 horas de uso diario durante 365 días, y el precio por kWh por consumo intermedio ($0.95), en donde se observó que a mayor área y tonelaje requerido el gasto es mayor especialmente en los equipos de tipo Mini Split frio/calor por una diferencia promedio de $1,574.35 pesos respecto a los Inverter frio/calor.

Cuadro 8. Proyección anual por uso de aires acondicionados.

Costos anuales por equipo frío/calor		
Concepto	**Mini Split**	**Inverter**
Consumo de energía por unidad de tiempo (kWh)	**1 tonelada:** 1,13	**1 tonelada:** 1,07
	1.5 toneladas: 1,80	**1.5 toneladas:** 1,079
	2 toneladas: 2,34	**2 toneladas:** 2,07
Tiempo en operación (anual)	4,380 horas	4,380 horas
Precio Promedio ($/kWh)	**1 tonelada:** $4,701.93	**1 tonelada:** $4,452.27
	1.5 toneladas: $7,489.8	**1.5 toneladas:** $4,489.72
	2 toneladas: $9,736.74	**2 toneladas:** $8,613.27
Importe Anual ($) IVA Incluido	**1 tonelada:** $5,454.24	**1 tonelada:** $5,164.63
	1.5 toneladas: $8,688.17	**1.5 toneladas:** $5,208.08
	2 toneladas: $11,294.62	**2 toneladas:** $9,991.40

A los costos de la tabla anterior se deben añadir los de mantenimiento preventivo (limpieza de equipo y partes, lubricación, cambio de filtros, ajuste de contactores y arrancadores y carga de gas), que no incluyen daños, y oscilan entre $2,000 y $3,000 pesos anuales; y en caso de no contar con equipos de aire acondicionado se deben incluir los costos de su adquisición que van de $6,000 (una tonelada) a

$15,000 (dos toneladas) para el caso de los equipos Mini Split frío/calor, y de $10,000 (una tonelada) a $20,000 (dos toneladas) aproximadamente para los Inverter frío/calor, además del costo de instalación que va de $1,000, siendo el precio más bajo el que ofrecen los técnicos particulares y $3,000 el más elevado, de empresas especializadas en el ramo.

Finalmente, se hizo una comparación aproximada de costos de los techos verdes y sistemas de climatización (cuadro 9), resultando en este caso más económicos los techos vegetales, particularmente el tratamiento extensivo, respecto a los equipos de aire acondicionado frío/calor.

Cuadro 9. Comparativo de costos de sistemas de climatización.

Costos anuales de sistemas de climatización.						
Área de habitación	**Mini Split frío/calor**	**Inverter frío/calor**	**Extensivo modular**	**Extensivo tradicional**	**Semi intensivo modular**	**Semi intensivo Tradicional**
10 m^2	$15,954.24	$19,664.63	$7,739.84 (8)	$4,899.8	$10,011.84 (8)	$7,739.8
15 m^2	$23,688.17	$24,708.08	$11,609.76 (12)	$7,349.7	$15,017.76 (12)	$11,609.7
20 m^2	$30,794.62	$34,491.4	$15,479.68 (16)	$9,799.6	$20,023.68 (16)	$15,479.6

*Esta comparación incluye los costos de los materiales y equipos, instalación y mano de obra, y mantenimiento, en el caso de los equipos de aire acondicionado se consideró un valor promedio de instalación de $2,000 pesos y mantenimiento de $2,500 pesos, y se tomaron en cuenta 12 horas de uso diario.

Los techos verdes no sustituyen la función de los equipos de climatización, sin embargo, su utilización en edificios y habitaciones con aires acondicionados, ha demostrado generar reducciones en el consumo energético por el uso de estos equipos, principalmente en temporadas cálidas (Liu y Bass, 2005., Trujillo, Rangel y Castañeda, 2015); en donde se obtiene una reducción en kWh, que se puede deber a que los techos verdes proporcionan los efectos necesarios para que un equipo de aire acondicionado alcance el reposo rápidamente, y, por ende, utilice menos energía eléctrica para alcanzar la temperatura deseada por el usuario.