



COLEGIO DE POSTGRADUADOS
INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS VERACRUZ

POSTGRADO DE AGROECOSISTEMAS TROPICALES

**TECHOS VERDES Y EL CONFORT TÉRMICO
EN ANGOSTILLO, VERACRUZ, MÉXICO**

ABRAHAM BELTRÁN MELGAREJO

T E S I S

PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

TEPETATES, MANLIO FABIO ALTAMIRANO, VERACRUZ

2013

La presente tesis, titulada: "**Techos verdes y el confort térmico en Angostillo, Veracruz, México**", realizada por el alumno: "**Abraham Beltrán Melgarejo**", bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
AGROECOSISTEMAS TROPICALES

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



DRA. MÓNICA DE LA CRUZ VARGAS MENDOZA

ASESOR:



DR. ARTURO PÉREZ VÁZQUEZ

ASESOR:



DR. J. CRUZ GARCÍA ALBARADO

ASESOR:



DRA. LILIANA CAMPOS ARRIAGA

Tepetates, Manlio Fabio Allamirano, Veracruz, 07 de Mayo de 2013

TECHOS VERDES Y EL CONFORT TÉRMICO EN ANGOSTILLO, VERACRUZ MEXICO

Abraham Beltrán Melgarejo, MC

Colegio de Posgraduados, 2013

Se diseñó un prototipo de techo verde con enredaderas tropicales y se evaluó el confort térmico brindado por éste en viviendas de una zona rural tropical. Con base en entrevistas a viveristas de la región centro de Veracruz y un recorrido de campo, se preseleccionaron cinco especies *Mandevilla sanderi*, *Solandra maxima*, *Passiflora edulis*, *Thunbergia alata* y *Cissus verticillata*. Se evaluó la adaptabilidad de éstas al ambiente sobre techos modelo en condiciones de campo, midiendo sus tasas de crecimiento, producción de hojas, cobertura del bastidor, facilidad de manejo, defoliación y la reducción de temperatura de los techos. Se seleccionó a *C. verticillata* como la especie más adecuada para su incorporación al prototipo de techo verde. Se comparó el confort térmico y la temperatura bajo la lámina del techo de habitaciones con y sin el prototipo de techo verde diseñado con *C. verticillata*, en tres viviendas de Angostillo, Veracruz. Se usó como indicadores de confort el Voto Medio Predicho (VMP), la Proporción de Personas a Disgusto (PPD), y el Voto Subjetivo (VS) de dos grupos evaluadores. El VMP, la PPD y el VS fueron mayores ($P < 0.01$, $P < 0.01$, y $P < 0.0001$, respectivamente) en las habitaciones sin techo verde indicando un menor confort en éstas. Asimismo, la temperatura promedio bajo la lámina de las habitaciones con techo verde fue hasta 4 °C menor ($P < 0.05$). Se concluye que el prototipo de techo verde diseñado con *C. verticillata* mejoró el confort térmico de las viviendas rurales evaluadas.

Palabras clave: Vivienda rural, enredaderas tropicales, *Cissus verticillata*, voto medio predicho.

GREEN-ROOFS AND THERMAL COMFORT IN ANGOSTILLO, VERACRUZ MEXICO

Abraham Beltrán Melgarejo, MC

Colegio de Postgraduados, 2013

A green-roof prototype with tropical vines was designed and the thermal comfort provided by it to tropical rural houses was evaluated. Based on interviews of plant nursery personnel in the central region of Veracruz and a field visit, five species were selected for evaluation: *Mandevilla sanderi*, *Solandra maxima*, *Passiflora edulis*, *Thunbergia alata* and *Cissus verticillata*. The adaptability of these species to roofs was evaluated under field conditions by measuring their growth rates, leaf production, cover provided by the sustaining frame, handling ease, defoliation and temperature reduction provided by the roofs. *Cissus verticillata* was selected as the most suitable species for incorporation into a green-roof prototype. Thermal comfort and temperature were measured in rooms under house roofs with (which contained *C. verticillata*) and without the green-roof prototype and the results from three houses in Angostillo, Veracruz, were compared. Indicators of comfort were obtained from two evaluated groups and included the Predicted Mean Vote (PMV), the Percentage of Persons Dissatisfied (PPD) and the Subjective Vote (SV). The PMV, PPD, and SV were significantly higher ($P < 0.01$, $P < 0.01$, and $P < 0.0001$, respectively) in rooms without a green-roof, indicating less comfort. The temperature under the roofs of rooms having green-roofs was 4°C lower ($P < 0.05$). The green-roof prototype with *C. verticillata* improved thermal comfort in the evaluated rural houses.

Key Words: Rural housing, tropical vines, *Cissus verticillata*, predicted mean vote.

DEDICATORIA

A mis Abuelos, Isabel y Joel que desde arriba siguen cada uno de mis pasos.

A mis padres, quienes han estado a mi lado apoyándome en todo momento y que han sido una guía y un gran ejemplo.

A Mi hermana, que siempre ha sido una inspiración para seguir adelante.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a **Dios** por darme la oportunidad de concluir una etapa más de mi vida, como lo es una Maestría en Ciencias

Al Colegio de Postgraduados, Campus Veracruz y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por hacer posible la oportunidad de hacer un programa de Maestría.

Al Fideicomiso Revocable de Administración e Inversión No. 167304 para establecimiento y operación de los fondos para la investigación científica y desarrollo tecnológico del centro público Colegio de Postgraduados, por el financiamiento parcial de la investigación de tesis.

La Línea Prioritaria de Investigación (LPI-4) Agronegocios, Agroecoturismo y Arquitectura del Paisaje, así como a la Microrregión de Atención Prioritaria (MAP) Angostillo, y el Colegio de Postgraduados Campus Veracruz y Campus Córdoba proveyeron apoyo financiero parcial y logístico para la realización de esta investigación.

A mi consejera Dra. Mónica de la Cruz Vargas Mendoza que fue un apoyo incondicional en toda la Maestría.

A Mi consejo Particular Dr. Arturo Pérez Vázquez, Dr. J. Cruz García Albarado y la Dra. Liliana Campos Arriaga quienes complementaron mi investigación con todo su conocimiento.

Gracias a la Biol. Lorena P. Sánchez Morales por la identificación de las especies silvestres.

A todos mis Amigos y Compañeros del Colegio de Postgraduados que siempre me hicieron sentir cobijado y apoyado.

CONTENIDO

| | Página |
|---|---------------|
| INTRODUCCIÓN GENERAL..... | 1 |
| 1. Planteamiento del problema..... | 1 |
| 2. Hipótesis..... | 3 |
| 3. Objetivos..... | 4 |
| 4. Revisión de literatura..... | 5 |
| 4.1. Techos verdes: Historia y actualidad..... | 5 |
| 4.2 Beneficios..... | 10 |
| 4.3 Potencialidades..... | 13 |
| 5. Literatura citada | 14 |
| | |
| CAPÍTULO I. USO POTENCIAL DE PLANTAS ENREDADERAS COMO TECHO VERDE EN LA REGIÓN CENTRAL DE VERACRUZ..... | 20 |
| Resumen..... | 20 |
| Abstract..... | 21 |
| 1.1. Introducción..... | 22 |
| 1.2. Materiales y métodos..... | 25 |
| 1.2.1. Primera fase..... | 25 |
| 1.2.2. Segunda fase..... | 27 |
| 1.2.3. Variables registradas..... | 28 |
| 1.3. Resultados..... | 30 |
| 1.3.1. Primera fase..... | 31 |
| 1.3.2. Segunda fase..... | 33 |
| 1.4. Discusión..... | 37 |
| 1.5. Literatura citada | 39 |
| | |
| CAPÍTULO II. PROTOTIPO DE UN TECHO VERDE CON ENREDADERAS TROPICALES PARA LA VIVIENDA RURAL Y SU CONFORT TÉRMICO..... | 42 |

| | |
|---|-----------|
| Resumen..... | 42 |
| Abstract..... | 43 |
| 2.1. Introducción..... | 44 |
| 2.2. Materiales y métodos..... | 47 |
| 2.2.1. Evaluación del confort térmico..... | 51 |
| 2.3. Resultados..... | 55 |
| 2.4. Discusión..... | 58 |
| 2.5. Literatura citada | 60 |
| | |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES..... | 63 |
| 1. Conclusiones..... | 63 |
| 2. Recomendaciones..... | 64 |
| | |
| ANEXO A..... | 65 |
| A1. Cuestionario aplicado a viveristas | 65 |
| A2. Memoria fotográfica..... | 66 |
| A3. Instrumento para la evaluación del Voto Subjetivo | 70 |

LISTA DE CUADROS

| | | Página |
|----------|--|---------------|
| Cuadro 1 | Listado de especies obtenidas en las entrevistas con las calificaciones asignadas por los viveristas..... | 32 |
| Cuadro 2 | Listado de las especies identificadas en campo con atributos para techo verde..... | 33 |
| Cuadro 3 | Características de la flora, infraestructura colocada y de las habitaciones con el prototipo de techo verde..... | 51 |

LISTA DE FIGURAS

| | | Página |
|------------|---|---------------|
| Figura 1. | Estructura utilizada para la evaluación de especies..... | 29 |
| Figura 2. | Longitud promedio (n=8, por especie) del tallo de las plantas evaluadas del 31 de marzo al 30 de septiembre de 2011. | 34 |
| Figura 3. | Promedios mensuales (n=8 por especie) de la tasa absoluta de crecimiento (TAC) (cm día ⁻¹) por especie. Símbolos correspondientes a septiembre y señalados con diferente letra, fueron estadísticamente diferentes (P < 0.025) según pruebas de Wilcoxon para pares de muestras. Símbolos sin letra no fueron incluidos en el análisis..... | 35 |
| Figura 4. | Cobertura del bastidor (%) por las distintas especies del estudio... | 36 |
| Figura 5. | Diferencia diaria promedio (n=4) de la temperatura (°C) de distintos techos verdes, respecto al testigo. Letras diferentes señalan diferencias significativas (□ de 0.05) entre tipos de cubierta, de acuerdo con la prueba de Tukey HSD..... | 37 |
| Figura 6. | Temperatura media diaria (°C) debido a la cobertura de las diferentes especies vegetales utilizadas como techo verde y el testigo. Letras diferentes señalan diferencias significativas (□ de 0.05) entre tipos de cubierta, de acuerdo con la prueba de Tukey HSD..... | 37 |
| Figura 7. | Diseño del prototipo de techo verde..... | 50 |
| Figura 8. | Data logger USB-500 colocado al centro de las habitaciones a una distancia de 15 cm con respecto de la lamina de zinc..... | 52 |
| Figura 9. | Temperatura promedio (+DE) bajo la lámina del techo de la habitación durante las evaluaciones de confort. Los asteriscos indican las probabilidades asociadas a pruebas de t de una cola para muestras pareadas, comparando las temperaturas promedio dentro de cada grupo evaluador..... | 56 |
| Figura 10. | Promedio por casa del voto subjetivo del grupo visitantes (+DE). La escala del voto de cero a tres, donde los valores más altos indican menor confort. Se indican resultados del análisis de varianza..... | 57 |
| Figura 11. | Promedio por casa del voto subjetivo del grupo residentes (+DE). | |

| | | |
|------------|--|----|
| | La escala del voto de cero a tres, donde los valores más altos indican menor confort. Se indican resultados del análisis de varianza..... | 57 |
| Figura 12. | Voto medio predicho por tipo de techo (+DE). La escala del voto del cero al tres, donde los valores más altos indican menor confort. Los asteriscos indican las probabilidades asociadas a pruebas de t de una cola para muestras pareadas, comparando los VMP dentro de cada grupo evaluador..... | 58 |
| Figura 13. | Porcentaje de personas a disgusto (+DE). Los asteriscos indican las probabilidades asociadas a pruebas de t de una cola para muestras pareadas, comparando los porcentajes promedio dentro de cada grupo evaluador..... | 59 |

INTRODUCCIÓN GENERAL

1. Planteamiento del Problema

Las edificaciones son un importante consumidor de energía, en México. El 23% de la energía es consumida por el sector doméstico (Torres, 2000), por lo que es necesaria la incursión en el mejoramiento de la eficiencia energética de las casas y edificios en los principales centros urbanos. Especialmente en lugares tropicales y subtropicales donde la radiación solar intensa conduce a un aumento de la carga térmica de los edificios, traducido en un uso más frecuente de los sistemas de aire acondicionado (Yi-Jing, 2010). En la mayoría de los casos, los techos de las construcciones reciben diariamente y de forma directa la mayor parte de la radiación solar, sin un aislamiento adecuado, dando lugar a la transferencia directa de calor en edificios (Teemusk y Mander, 2010).

Ante dicha problemática surgen los techos verdes, cuyo objetivo es colocar deliberadamente vegetación sobre la superficie de las construcciones, teniendo como meta principal la reducción de aguas pluviales y mejorar la eficiencia energética de las construcciones (Bass y Baskaran, 2003; Banting *et al.*, 2005; Bass *et al.*, 2005; Sailor, 2008; Ayata *et al.*, 2011). Según Niachou *et al.* (2001) las ventajas de los techos verdes son numerosas, desde ecológicas hasta sociales, y son un medio para mitigar asuntos ambientales de un entorno urbano (Takakura *et al.*, 2000).

La construcción de los techos verdes es muy variada y pueden ser intensivos o extensivos. Los extensivos se caracterizan por presentar una fina capa de sustrato que llega únicamente hasta los 15 cm de espesor y se utiliza comúnmente vegetación resistente a la sequía y con un aporte hídrico bajo. Además tienen un amplio potencial de aplicación para la construcción, debido a su

peso ligero, requieren un mínimo de riego, una fertilización constante y deshierbe en comparación con los techos verdes intensivos (FLL, 2010).

Los techos verdes intensivos se caracterizan por un presentar una capa de suelo profunda, elementos pavimentados, cuerpos de agua y los tres estratos de vegetación, árboles, arbustos y plantas perennes combinados con elementos ligeros para el acceso humano, tales como cubiertas, asientos, pequeños macetones y artículos decorativos (Cantor, 2008). El peso es significativo, por lo que sólo son factibles en edificios con estructuras reforzadas en su mayoría de acero y hormigón (Osmundson, 1999; Cantor, 2008).

La investigación reciente sobre techos verdes se orienta principalmente al: a) análisis de comportamiento térmico del techo verde y de sus materiales, b) estudios experimentales por medio de monitoreo, c) programas de simulación térmica (Sailor, 2008), d) análisis del confort térmico en espacios provistos con techos verdes respecto aquellos sin techo verde, e) análisis de los efectos de la maduración de los techos en el contexto urbano, y f) métodos mixtos entre experimentación y simulación por computadora (Renato, *et al.*, 2005). No obstante, poca investigación se ha realizado sobre innovaciones en el diseño y la implementación de nuevas especies con potencial de uso.

Los techos verdes son una respuesta para mejorar la calidad de vida en centros urbanos más no de zonas rurales. La vivienda rural es un espacio construido con una parte interna y otra externa determinada por las actividades que realiza la familia, inmersa en agroecosistemas que cultiva y transforma (Sánchez y Jiménez, 2010). Los contrastes sociales, étnicos, económicos y políticos de México previos a la revolución de 1910 se reflejaron en las viviendas. Los latifundios

influenciados por los españoles hicieron que las casas tomaran características de zonas templadas; mientras que las chozas prehispánicas indígenas mostraban menos cambios y mayor adaptabilidad ecológica (Bolis, 1982). Siguiendo dicha línea las casas de la vivienda rural, hoy en día se caracterizan por ser pequeñas, de poca altura, de materiales pesados y con poca vegetación a sus alrededores, teniendo la dificultad de lograr diseños coherentes a los valores ambientales (Aguilar, 2001), dando como resultado que la relación trabajo-producción-vida familiar queda desarticulada (Sánchez y Jiménez, 2010) y gran parte se le atribuye a la incomodidad que se genera por el calor en los espacios de convivencia.

En zonas con climas cálidos secos y tropicales, se requiere de sistemas de enfriamiento pasivo en las edificaciones, más aún en las zonas rurales tropicales, para lograr temperaturas que se mantengan dentro del área de confort térmico, con un consumo reducido de energía eléctrica. Además, la vegetación son elementos arquitectónicos que pueden contribuir a una adecuación climática. Por lo anterior, se consideró necesario investigar si los techos verdes modificados pueden adaptarse a las características estructurales y climáticas de la vivienda rural tropical y si son una opción viable para mejorar el confort térmico que brindan.

2. Hipótesis

General

Un prototipo de techo verde diseñado con enredaderas tropicales mejora el confort térmico de viviendas rurales tropicales.

Específicas

- Al menos cinco especies de enredaderas tropicales poseen potencial para su incorporación en techos verdes.
- Al menos una especie de enredadera es capaz de adecuarse al ambiente y requerimientos biofísicos y de manejo del prototipo de techo verde.
- Las habitaciones provistas de un prototipo de techo verde diseñado con una especie de enredadera tropical tendrán mayor confort térmico que habitaciones sin este prototipo.

3. Objetivo

General

Diseñar un prototipo de techo verde con especies de enredaderas tropicales que mejore el confort térmico de las casas de Angostillo, Veracruz.

Particulares

- Elaborar un listado de especies de enredaderas tropicales que crecen en la región y calificar su potencial de uso en techos verdes.
- Seleccionar, de entre las cinco especies con mayor potencial para su uso en techos verdes, la especie de mejor desempeño y adaptación al ambiente del prototipo de techo verde.
- Evaluar y comparar el confort térmico provisto por el prototipo de techo verde respecto al techo actual en casas rurales con lámina de zinc.

4. Revisión de literatura

4.1. Techos verdes: historia y actualidad.

El uso histórico de vegetación en techos se ubica en varios países, desde los jardines colgantes de Babilonia a las chozas de césped en Islandia durante la época vikinga (Dunnett y Kingsbury, 2008). Los techos verdes tienen su origen en Escandinavia y poco a poco fueron expandiéndose hasta llegar a Alemania con una clara evolución. (Köhler y Keeley, 2005).

Los primeros techos verdes se ha documentado que se originan en Islandia y Noruega durante la época de los vikingos en los años 900 d. C. El surgimiento de los techos verdes se atribuye a la abundante disponibilidad local de césped en las costas escandinavas del norte, técnica utilizada por su valor aislante (Berg, 2009). Desde entonces se extendió el uso de dicho método durante más de 1000 años en construcciones de madera y roca, específicamente en casas rurales y granjas. Las primeras versiones de techos verdes, similares a las que conocemos hoy en día, se construyeron en Noruega, sobre plataformas de madera con corteza de abedul y pino como material de impermeabilizante y pequeñas ramas con grava como capa de drenaje. La capa de vegetación constaba de césped cosechado de prados cercanos a la construcción (Berg, 2009). Al sur de Europa los techos eran construidos comúnmente de paja, utilizando un tipo de pasto, conocido como pasto de pantano (*Phragmites australis*). Esta gramínea, es propia de climas templados en Europa, por lo que la disponibilidad era poca para ser utilizada en techos. Por tal motivo, el uso de tejas de arcilla fue lo más común en gran parte de Escandinavia y hasta la actualidad. Pero también gran parte de dicha zona está cubierta con láminas de granito típico del Escudo Báltico (Noruega, Suecia y Finlandia) por lo que la fabricación de teja también fue escasa. Debido a estas presiones surgen los techos verdes extensivos en Noruega e Islandia, que eran esencialmente resultado del uso de materiales locales (Vreim, 1966).

Durante el año 1900 en la zona central Europa, los constructores en Alemania comenzaron a cubrir los techos con una capa delgada de alquitrán y con una capa de arena de 10 o 15 cm como un supresor de incendios en tiempo de secas. Esta capa de arena era lo suficientemente profunda para albergar plantas nativas. Estos techos fueron colonizados naturalmente por pastos nativos y especies pioneras locales que generalmente crecen entre las rocas (Köhler y Keely, 2005).

A principios de 1930, los primeros beneficios asociados con los techos verdes fueron documentados en Alemania. Antes de la Segunda Guerra Mundial, el Botánico W. Kreh cuenta que los techos verdes de crecimiento espontáneo mejoraron el ambiente térmico en el interior de las casas y comenzó a medir el rendimiento térmico de los techos verdes. La Segunda Guerra Mundial puso fin a esta investigación, hasta que se reanudó por el botánico Reinhard Bornkamm a finales de 1950, después de la guerra (Köhler, 2006). Hasta entonces los problemas que presentaban los techos verdes, eran los daños causados por las raíces. Este se considera como el inicio de la técnica de construcción de techos verdes en Alemania que se utilizan hoy en día (Köhler y Keely, 2005).

El primer techo verde moderno construido en Europa para prevenir el sobrecalentamiento de una construcción se realizó en la planta de tratamiento de agua en Moos, Suiza (Brenneisen, 2003). Debido a la alta temperatura del agua, la instalación estaba teniendo problemas con sobre carga bacteriana en el agua. Cuando la planta de tratamiento de agua fue re-techado utilizando un techo verde, este problema se resolvió. El techo verde Moos fue construido en 1911, y fue elaborado con tierra y césped de los prados circundantes. Estas praderas contenían una variedad de flores silvestres y hierbas, incluyendo varias especies de orquídeas. Hoy en día, es el hogar de especies de plantas en peligro de extinción que han desaparecido localmente debido a la ganadería

intensiva y el desarrollo urbano. Este techo está actualmente bajo consideración como hábitat protegido federalmente (Brenneisen, 2006).

La investigación alemana en techos verdes abarca desde el año 1932 a 1970 y a partir de dicha fecha comenzaron a ser cada vez más utilizados por los beneficios que brindan a las construcciones. Debido a los beneficios de captación de agua de lluvia y la disminución de temperatura hicieron atractiva dicha tecnología (Köhler y Keely, 2005). Este desarrollo fue seguido por la directriz en techos verdes, elaborada por la Sociedad de Paisaje de Investigación, Desarrollo y Construcción, conocido como la FLL, para abreviar Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau, refiriéndose a la Guía de planeación, ejecución y mantenimiento de techos verdes; el primer volumen fue publicado en 1982 por la Sociedad del paisaje, investigación, desarrollo y construcción (Oberndorfer *et al.*, 2007; Dvorak y Volder, 2010).

La guía FLL se actualiza continuamente en base a la investigación que se realiza, con el objetivo de cómo crear mejores y más duraderos techos verdes (FLL, 2010). Actualmente, Alemania es líder mundial en implementación de techos verdes. En Stuttgart, se estima que el 30% de los techos planos tiene implementado algún tipo de techo verde y es el porcentaje más alto de cualquier ciudad en el mundo (Dunnett y Kingsbury, 2008).

Con el inicio en Alemania de los techos verdes se convirtieron en una tecnología de uso común en otras áreas del norte de Europa como Suiza, Holanda, Dinamarca, Noruega y Suecia. En Noruega, donde los techos verdes extensivos tienen una historia de 1000 años de uso, se utilizan principalmente casas rurales de techos altos, casas de campo y graneros. Suecia, por otra parte, ha

incursionado en la implementación de techos verdes en techos planos de zonas urbanas, por lo general cubiertos de pastos nativos. Suiza es otro donde la investigación se centra en su valor para la conservación de biodiversidad y como medida de mitigación para contrarrestar la pérdida de vegetación (Brenneisen, 2006).

Alemania ha sido líder en la innovación constante de techos verdes. La industria de techos verdes ha sido apoyada por una combinación de política, investigación, desarrollo de la industria y la demanda social. El Dr. Manfred Köhler, arquitecto paisajista, ha jugado un papel importante en el desarrollo y la actualización de las directrices de techos verdes (Köhler y Poll, 2010). Versiones revisadas y actualizadas de cambios en techos verdes son anexadas a la FLL y son dispersadas lo más rápido posible, lo que se ve reflejado en la industria de la construcción (FLL, 2010).

Hasta hace una década, ha habido una expansión en la investigación de los techos verdes en América, especialmente en Estados Unidos y Canadá, los cuales han apoyado el desarrollo de estándares; la certificación LEED (*Leadership in Energy & Environmental Design*) es una de los estándares más utilizados para la construcción de techos verdes en Estados Unidos, creado por el “*Building Council*” para la certificación de los edificios que tienen un menor impacto ambiental con la implementación de techos verdes (Scherba *et al.*, 2011).

Así mismo, se han generado algunas guías locales (ANSI/SPRI VF-1, *External Fire Design Standard for Vegetative Roofs*, ANSI/SPRI RP-14 *Wind Design Standard for Vegetative Roofing Systems* y ANSI/GRHC/SPRI VR-1 *2011 Procedure for Investigating Resistance to Root Penetration on Vegetative Roofs*) que sirven para facilitar la construcción de techos verdes con materiales locales que cumplen las normas necesarias (Dvorak y Volder, 2010).

Hoy en día en América existen libros con distintas metodologías para la construcción de techos verdes y estudios de caso de la implementación de cada técnica (Dvorak, 2009). La generación de diversos trabajos es con el objetivo de lograr la mejora en el diseño y la implementación de techos verdes y su contraste con el paisaje, incluso se encuentran distintas ecorregiones que revelan la gama de plantas con potencial de uso en techos verdes adaptadas a distintas condiciones ambientales (Cactus and Succulent Society of America, 2008; Dvorak, 2009).

En México, Centro y Sudamérica la incursión en techos verdes tiene poco tiempo, pero los avances realizados han sido significativos. En Buenos Aires, Argentina y en Bogotá, Colombia, se han generado iniciativas para implementar techos verdes en los edificios públicos, incluyendo museos y edificios gubernamentales; así mismo Universidades Sudamericanas han desarrollado la aplicación de bandejas modulares, con el fin de disminuir el peso de los techos verdes y con la implementación de bio-tejas de contención individual de plantas. En el Distrito Federal en México para el año 2015 lanzará un norma ambiental (NADF-03-RNAT-2007) para fomentar el uso de techos verdes. A la fecha en todo México existen más de 60,000 m² de techos verdes y el 90% se localiza en el Distrito Federal, Guadalajara y Monterrey (Müller-García, 2005).

Los proyectos de techos verdes llegaron a México en 1999, iniciando sus actividades en el Instituto de Biología de la UNAM en acuerdo con la Comisión de Recursos Naturales del Gobierno de la Ciudad de México (CORENA), como una medida de gestión para mitigar los altos índices de contaminación atmosférica (Müller-García, 2005). Los recursos para iniciar dichos proyectos fueron financiados por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Uno de los primeros techos verdes fue colocado en el Jardín Botánico del Instituto de Biología de la

UNAM con colaboración de la Universidad Autónoma de Chapingo. Tanya Muller García ha sido una de las pioneras en diversos estudios de techos verdes y actualmente es la Directora de Reforestación Urbana de Parques y Ciclovías del Distrito Federal (Müller-García, 2005).

4.2. Beneficios.

El beneficio principal de los techos verdes ocurre por medio de la evapotranspiración del agua, la fotosíntesis y la capacidad de almacenar calor de su propia agua (Jian-Feng *et al.*, 2010). Este efecto de enfriamiento es conocido como regulación térmica, que se hace perceptible fundamentalmente en los días cálidos de verano, ya que puede demandarle el 90% de la energía solar consumida. Lo mismo sucede cuando por la noche condensa la humedad de las plantas y la formación de rocío en techos verdes trae consigo una recuperación de calor. Por tanto, las plantas pueden a través de la evapotranspiración y la condensación de agua, reducir las variaciones de temperatura en una casa (Ayata *et al.*, 2011; Tabares-Velasco y Srebric, 2011).

Los beneficios de regulación de temperatura, por la capa de vegetación formada sobre techos tienen un alto efecto de aislación térmica, debido a la formación de un colchón de aire entre la capa de plantas y el cemento, obteniendo una capa de aislante térmico. Cuanto más denso y grueso sea éste, mayor es el efecto; una densa capa de vegetación impide que el viento llegue a la superficie del sustrato y como no existe movimiento de aire, la pérdida de calor por efecto de viento es mínima (Oberndorfer *et al.*, 2007; Ayata *et al.*, 2011).

La captación de agua de lluvia es otro beneficio de suma importancia. Se ha demostrado que se retiene y evapotranspira entre el 34% y el 69% de la precipitación con un promedio de retención del 56% (Bengtsson *et al.*, 2005), esto influiría de gran manera en la reducción de inundaciones

en los centros urbanos. Los techos verdes son más frecuentes en América del Norte como un medio para controlar las escorrentías en zonas urbanas (Getter y Rowe, 2006; Teemusk y Mander, 2007). Los estudios en cuanto al aporte de nutrientes ha demostrado que el escurrimiento proveniente de techos verdes son una fuente de fósforo en la escorrentía (Liptan y Strecker, 2003; Hathaway *et al.*, 2008). El porcentaje de abono en la tierra y los fertilizantes utilizados son los dos componentes clave que contribuyen a nutrientes en la escorrentía (Emilsson *et al.*, 2007; Teemusk y Mander, 2007; Hathaway *et al.*, 2008).

Respecto a la captación de contaminantes por techos verdes se ha determinado que el cobre (Cu) y zinc (Zn) son los metales comúnmente encontrados en escurrimientos de techos verdes (MacMillan, 2004; Alsup *et al.*, 2010). Los metales disueltos pueden ser más tóxicos para la vida acuática (Makepeace *et al.*, 1995). Además, pocos estudios han realizado análisis de calidad de agua en una amplia lista de componentes que incluyen nitrógeno (N), fósforo (P) y metales pesados (Berndtsson *et al.*, 2006; Berndtsson *et al.*, 2009; Berndtsson, 2010).

La captación de contaminantes no sólo es llevada a cabo por el agua de lluvia, parte de los beneficios brindados por la vegetación implementada en techos verdes es la eliminación de contaminantes por la absorción estomática y la degradación de algunos compuestos orgánicos como hidrocarburos poliaromáticos en los tejidos de sus plantas o en el suelo (Baker y Brooks, 1989). Nowak (2006) estima que los árboles capturan 711.000 ton³ de CO₂ por año. Sin embargo, en muchos lugares urbanos hay pocos árboles, pero existen espacios disponibles para la implantación de plantas en techos, que comprenden el 40-50% de la superficie en una zona urbana (Dunnett y Kingsbury, 2004). Se estima que 1 m² de césped de un techo verde puede eliminar hasta 4000 kg de polvos y partículas suspendidas (Johnson y Newton, 2004). Clark *et*

al. (2005) estiman que si el 20% de todas las superficies de techos industriales y comerciales en Detroit, MI, se les implementaran techos verdes de *Sedum*, captarían más de 800.000 kg anuales de NO₂ (o el 0,5% de los que las emisiones áreas) y se eliminarían.

Otro de los beneficios de los techos verdes es la reducción de ruido mediante la absorción y dispersión del mismo. Las plantas funcionan como una alfombra, la cual es capaz de absorber una parte significativa del ruido (Oberndorfer *et al.*, 2007; Sailor y Hagos, 2011).

Los techos verdes también brindan un beneficio social, ya que visualmente, es distinto el efecto que produce un techo de color terracota, gris o negro, que el de un techo de plantas, que con su belleza natural y matices de color verde, incrementa el estado de ánimo humano. No sólo la época del año modifica la apariencia formal del techo verde sino que también existen variaciones a causa de los diversos agentes atmosféricos como corrientes de aire, lluvia y nevadas; también a través del transporte de semillas por pájaros o viento; surgen nuevas hierbas y pastos silvestres sobre el techo, y con las heladas y sequías desaparecen algunas plantas (Dvorak, 2009).

Una casa con presencia de plantas se ajusta mejor al entorno, se integra mejor con el paisaje que una casa sin espacios verdes, particularmente cuando el techo llega hasta el nivel del jardín; por lo tanto la vegetación de éste sube directamente a la del techo. Los techos verdes extensivos pueden convertirse en espacios recreativos y de convivencia social (Jian-Feng *et al.*, 2010), e incluso pueden generar la producción de alimentos para consumo o comercialización y como parcelas demostrativas para la educación social (Oberndorfer *et al.*, 2007).

Los techos verdes ofrecen múltiples beneficios a las construcciones y edificios, como la inclusión de membranas de larga duración, mayor rendimiento energético, y una reducción general del mantenimiento en comparación a los antiguos sistemas de techos verdes tradicionales (Köhler *et al.*, 2002). En Europa el mercado de techos verdes ha seguido la directriz de implementación de techos verdes únicamente para mejorar los costos asociados al mantenimiento del edificio (De Nardo *et al.*, 2005; Getter y Rowe, 2006), ya que las membranas evitan la exposición directa tanto a altas temperaturas y rayos UV, como a temperaturas bajas menores a 0 °C (Porsche y Köhler, 2003). Uno de los desarrollos tecnológicos más avanzados es la implementación de un polietileno de alta densidad utilizado como barrera anti raíz, científicamente probado para resistir todo tipo de raíces, incluso de plantas invasoras (FLL, 2010). Las nuevas capas de drenaje están capacitadas para filtrar y drenar toda el agua captada evitando el taponamiento u obstrucción de cualquier material orgánico (FLL, 2010).

4.3. Potencialidades.

Los techos verdes ha sido reconocidos como una solución viable para aumentar la cobertura de vegetación y restablecer el espacio verde desaparecido en las zonas urbanas (Kumar y Kaushik, 2005; Hui y Chan, 2008). Indicando que los techos verdes no sólo pueden reducir la huella ecológica de los edificios en los ecosistemas urbanos, sino también que mejoran la apariencia de los edificios, ya que la instalación de estos es un sistema que emula paisajes naturales (Wong *et al.*, 2003).

Parte trascendental de los techos verdes es que siempre y cuando la sociedad los vea como un beneficio, estos pueden ser adoptados en un contexto local (Wong *et al.*, 2003). Los potenciales

primarios de un techo verde son la fácil implementación, ya que se puede llevar a cabo en casi todas las épocas del año, los materiales son fáciles de conseguir al igual que las plantas utilizadas.

En Alemania los modelos de simulación por medio de software, han demostrado que la presencia de un 7% de techos verdes en las zonas urbanas disminuir la temperatura 2 °C en el verano (Hui, 2009). Estudios realizados en Toronto y Nueva York indican que si más del 50% de la superficie total del techo principal en áreas urbanas están cubiertos por vegetación, la temperatura urbana puede reducirse hasta 0.8 °C (Lui y Bass, 2005; Rosenzweig *et al.*, 2006). Wong *et al.*, (2003) evaluaron el desempeño del sistema de techo verde en Singapur y encontraron que el consumo anual de energía potencial ahorrado osciló entre el 1% y el 15%, dependiendo de las características de la azotea verde en un edificio comercial de cinco pisos.

Por último, un techo verde puede proporcionar una forma para acreditar el sello ambiental a través de las normas de calificación verdes y herramientas tales como el sello LEED que ofrecen créditos para la instalación del sistema de techo verde (Wilkinson y Reed, 2009).

5. Literatura citada

Aguilar B. 2001. La vivienda rural su complejidad y estudio desde diversas disciplinas. Luna Azul 30:12-14.

Ayata T., O. Tabares-Velasco y J. Srebric. 2011. An investigation of sensible heatfluxes at a green roof in a laboratory setup. Building and Environment 46:1851–1861.

Baker A. J. M. y R. R. Brook. 1989. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements – a review of their distribution, ecology and phytochemistry. Biorecovery 1:81–126.

- Banting D., H. Li, Doshi., J, P, Missios, Au, A, Currie. B y Verrati M. 2005. Report on the Environmental Benefits and Costs of Green Roof Technology for the City of Toronto. City of Toronto and Ontario Centres of Excellence – Earth and Environmental Technologies, Toronto.
- Bass B. y B. Baskaran. 2003. Evaluating Rooftop and Vertical Gardens as an Adaptation Strategy for Urban Areas. Ottawa (Canada): National Research Council Canada, Institute for Research in Construction. Report no. NRCC-46737.
- Bass B., E. Krayenhoff , A. Martilli., R. Stull y H. Auld. 2005. The impact of green roofs on Toronto's urban heat island. Proceedings of the First North American Green Roof Conference 1: 292–304.
- Bengtsson L., L. Grahn y Olsson J. 2005. Hydrological function of a thin extensive green roof in southern Sweden. Nord. Hydrol. 36: 259–268.
- Berg A. 2009. The ecology of building materials. Architectural Press. London. UK. 453 p.
- Berndtsson J. C., L. Bengtsson y T. Emilsson. 2006. The influence of extensive vegetated roofs on runoff water quality. Science of the Total Environment 355 (1-3): 48-63.
- Berndtsson J. C. 2010. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: a review. Ecological Engineering 36: 351-360.
- Berndtsson J. C., L. Bengtsson y K. Jinno. 2009. First flush effect from vegetated roofs during simulated rain events. Hydro Res. 39(30): 171-19.
- Bolis G. 1982. Las casas campesinas en el Porfiriato. V Memoria y olvido: imágenes de México. Martín Casillas. México, D.F., México. pp 65.
- Brenneisen S. 2006. Space for urban wildlife: designing green roofs as habitats in Switzerland. Urban Habitats 4:27–33.
- Cactus and Succulent Society of America. 2008. Green Roofs. Cactus and Succulent Journal 80(3): 2.

- Clark C., P. Adriaens y F. B. Talbot. 2005. Green roof valuation: a probabilistic economic analysis of environmental benefits. *Environmental Science Technology* 42:2155–2161.
- De Nardo J. C., A. R. Jarrent , H. B. Manbeck, D. J. Beattie y R. D. Berghage. 2005. Stormwater mitigation and surface temperature reduction by green roofs. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 48: 1491–1496.
- Dunnett N. y N. Kingsbury. 2004. *Planting Green Roofs and Living Walls*. Timber Press. Portland. USA.
- Dunnett N. y N. Kingsbury. 2008. *Planting green roofs and living walls*. Timber Press. Portland. USA.
- Dvorak, B. 2009. Green roofs in sustainable landscape design. *Landscape and Urban Planning*. 92: 3-4.
- Dvorak, B. y A. Volder. 2010. Green roof vegetation for North American ecoregions: a literature review. *Landscape and Urban Planning* 96(4):197-213.
- Emilsson T., J. Berndtsson., J. Mattsson y K. Rolf. 2007. Effects of using conventional and controlled release fertilizer on nutrient runoff from various vegetated roof systems. *Ecological Engineering* 29(3): 260-271.
- FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftshau). 2002. *Guideline for the Planning, Execution and Upkeep of Green Roof Sites*. Landscape, Research, Development and Construction Society of Germany.
- Getter K.L. y D. B. Rowe 2006. The role of green roofs in sustainable development. *Hortscience* 41:1276–1286.
- Hathaway A. M., G. Hunt F. y G. Jennings D. 2008. A field study of green roof hydrologic and water quality performance. *Trans. ASABE* 51:37–44.
- Hui S., C.M. 2009. Study of thermal and energy performance of green roof systems. *University of Hong Kong Proceedings of Joint Symposium on Low Carbon High Performance Buildings*. Pp 8.

- Hui S., C. M. y H. Chan M. 2008. Development of modular green roofs for high-density urban cities. Memories of the World Green Roof Congress 17–18 September. London.
- Johnson J. y J. Newton. 2004. Building Green. A Guide for Using Plants on Roofs and Pavement. Greater London Authority. Disponible en línea en https://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CDYQFjAB&url=http%3A%2F%2Flegacy.london.gov.uk%2Fmayor%2Fstrategies%2Fbiodiversity%2Fdocs%2FBuilding_green.rtf&ei=xZltUaTAD4SJyWG1-IGYBA&usg=AFQjCNHC4xhdd1XQDo94IgwgrAbBZfMswA&sig2=dhuc2wXMBWjuqS_t5jJgGQ
- Köhler M. 2006. Long-term vegetation research on two extensive green roofs in Berlin. Urban Habitats 4:3–26.
- Köhler M. y M. Keeley. 2005. The green roof tradition in Germany: The example of Berlin. In Hoffman L y McDonough W. (eds.). Green Roofs: Ecological Design and Construction. Schiffer Press. New York. USA. Pp. 108–112.
- Köhler M., Schmidt M., Grimme F., Laar M., de Assuncao P.V. y Tavares, S. 2002. Green roofs in temperate climates and in the hot-humid tropics – far beyond the aesthetics. Environment and Health 13:382-391.
- Köhler M., y P. Poll 2010. Long-term performance of selected old Berlin green roofs in comparison to younger extensive green roofs in Berlin. Ecological Engineering 36:722-729.
- Kumar R., y S. Kaushik C. 2005. Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings. Building and Environment. 40 (11): 1505–1511
- Liptan T. y E. Strecker. 2003. EcoRoofs (Green roofs) a more sustainable infrastructure. Memories of the National Conference on Urban Stormwater: Enhancing Programs at the Local Level Chicago, IL. Pp 17–20.
- Lui K. y B. Bass. 2005. Performance of green roof systems. National Research Council Canada. Report No. NRCC-47705.

- MacMillan G. 2004. York University rooftop garden storm water quantity and quality performance monitoring report. Memories of the Second North American Green Roof Conference: Greening Rooftops for Sustainable Communities Portland, OR, Pp 2–4,
- Makepeace D. K., D. Smith W., y S. Stanley J. 1995. Urban storm water quality: summary of contaminant data. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 25:93–139.
- Müller-García T. 2005. Evaluation of the first green roof in the District of Xochimilco in Mexico City after 15 Months. Memories of the World Green Roof Congress, Basel-Switzerland. Pp12.
- Niachou A., K. Papakonstantinou., M. Santamoris., A. Tsangrassoulis., y G. Mihaakakou. 2001. Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. *Energy and Building* 33: 719-729.
- Nowak D. J. 2006. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry and Urban Greening* 4: 115–123.
- Oberndorfer E., J. Lundholm., B. Bass., R. Coffman R., H. Hoshi., N. Dunnett., S. Gaffin., y B. Rowe. 2007. Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions and services. *BioScience* 57:823-833.
- Osmundson T. 1999. *Roof Gardens - History, Design and Construction*. W.W. Norton & Company. New York. USA.
- Porsche U. y M. Köhler. 2003. Life cycle costs of green roofs: A comparison of Germany, USA, and Brazil. *Proceedings of the World Climate and Energy Event*. Rio de Janeiro.
- Renato M., F. Lazzarin., y F. Castellotti. 2005. Experimental measurements and numerical modeling of a green roof. *Energy and Buildings* 37: 1260 – 1267.
- Rosenzweig C., W. Solecki., L. Parshall., S. Gaffin., B. Lynn y R. Goldberg 2006. Mitigating New York City's heat island with urban forestry, living roofs, and light surfaces. *Sixth Symposium on the Urban Environment*. USA, Atlanta.

- Sailor D. J. 2008. A green roof model for building energy simulation programs. *Energy and Buildings* 40 (8):1466-1478.
- Sailor D. J. y M. Hagos. 2011. An updated and expanded set of thermal property data for greenroom growing media. *Energy and Buildings* 43 (9):2298-2303.
- Sánchez Q.C., y R. E. Jiménez O. 2010. La vivienda rural, su complejidad y estudio desde diversas disciplinas. *Luna Azul* 30: 174-196.
- Scherba A., D. Sailor J., T. Rosenstiel N., y C. Wamser C. 2011. Modeling impacts of roof reflectivity, integrated photovoltaic panels and greenroof systems on sensible heat flux into the urban environment. *Building and Environment* 46(12): 2542-2551.
- Tabares-Velasco P. C. y J. Srebric. 2011. A heat transfer model for assessment of plant based roofing systems in summer conditions. *Building and Environment* 49:310-323.
- Takakura T., S. Kitade., y E. Goto. 2000. Cooling effect of greenery cover over a building. *Energy and Buildings* 31: 1-6.
- Teemusk A. y U. Mander. 2007. Rainwater runoff quantity and quality performance from a green roof: the effects of short term events. *Ecological Engineering* 30 (3):271-277.
- Teemusk A. y U. Mander. 2010. Temperature regime of planted roofs compared with Conventional roofing systems. *Ecological Engineering* 36 (1):91-95.
- Torres F. 2000. El cambio de horario: su impacto en la economía de los hogares urbanos de México. *Revista Momento Económico* 112:44-51.
- Wilkinson S. J. y R. Reed. 2009. Green roof retrofit potential in the central business district. *Property Management* 27(5): 284-301.
- Wong N.H., D. Cheong K., J. Yan., C . Soh., Soh, L., C. Ong. y Sia A. 2003. The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore. *Energy and Buildings* 35: 353-364.
- Yi-Jing L. 2010. Thermal performance of different planting substrates and irrigation frequencies in extensive tropical rooftop greeneries. *Building and Environment* 18: 345-355.

CAPÍTULO I. USO POTENCIAL DE PLANTAS ENREDADERAS COMO TECHO VERDE EN LA REGIÓN CENTRAL DE VERACRUZ

Resumen

Los techos verdes son una alternativa arquitectónica que brinda un efecto regulador de la temperatura y la humedad al interior de las casas, y reduce el consumo de energía eléctrica. Si bien, los techos verdes son muy utilizados en Europa, son escasos los estudios para su adaptación al trópico. Los techos verdes convencionales incluyen flora de zonas templadas, así como materiales que implican una inversión elevada. El objetivo de este estudio fue evaluar el potencial de cinco especies de enredaderas en un prototipo de techo verde para la vivienda rural tropical. Se realizaron entrevistas a viveristas de la región centro de Veracruz y un recorrido de campo por tres municipios de la región. Se seleccionaron cuatro especies cultivadas *Mandevilla sanderi* (mandevilla), *Solandra maxima* (copa de oro), *Passiflora edulis* (maracuyá), *Thunbergia alata* (tumbergia) y una especie silvestre, *Cissus verticillata* (tripa de vaca o manta de cielo). Se evaluó el desempeño de estas especies como techo verde en un prototipo en condiciones de campo, comparando tasas de crecimiento, producción de hojas, cobertura del bastidor, facilidad de manejo, defoliación y reducción de la temperatura de los techos prototipo. Se encontró que *C. verticillata* tuvo una tasa de crecimiento significativamente mayor ($P < 0.05$) que las otras especies y mantuvo una temperatura bajo el techo significativamente menor que el testigo y que las otras cubiertas ($P = 0.0157$). Se concluye que por su crecimiento, facilidad de manejo y escasa defoliación, *Cissus verticillata* es una enredadera recomendable para su uso en techos verdes de casas rurales tropicales.

Palabras clave: especies nativas, *Solandra maxima*, *Thunbergia alata*, *Cissus verticillata*.

POTENTIAL USE OF TROPICAL VINES FOR GREEN-ROOFS IN CENTRAL VERACRUZ

Abstract

Green-roofs are an architectural alternative that aids in regulating air humidity and temperature inside houses, thereby reducing energy consumption. Although green-roofs are widely used in Europe, studies on adaptation of this technology to the tropics are scarce. Conventional green-roofs include temperate flora and materials that usually imply a high investment. The objective of this study was to evaluate five species of vines for use in a green-roof prototype in tropical rural housing. Through interviews of plant nursery operators in the central region of Veracruz state, and a field assessment across three municipalities in the region, four cultivated species were chosen: *Mandevilla sanderi* (mandevilla), *Solandra maxima* (copa de oro), *Passiflora edulis* (maracuyá), *Thunbergia alata* (tumbergia), as well as a wild species, *Cissus verticillata* (tripa de vaca or manta de cielo). The performance of these five species was assessed on a model field roof by comparing growth rate, leaf production, cover, ease of handling, and temperature reduction. *Cissus verticillata* had a significantly higher growth rate ($P < 0.05$) than the other four species and maintained a significantly lower roof temperature than the control and other cover treatments ($P = 0.0157$). For the described traits, as well as for its ease of handling and low defoliation, *Cissus verticillata* is highly recommended for green-roofs in tropical rural houses.

Key words: native species, *Solandra maxima*, *Thunbergia alata*, *Cissus verticillata*.

1.1. Introducción

En las últimas décadas, nuevas corrientes arquitectónicas han incursionado en el mejoramiento de la eficiencia energética de las construcciones y edificios en diversas zonas urbanas del mundo. Una de estas corrientes son los techos verdes. Alemania es uno de los países líderes en techos verdes y esta corriente se ha ido extendiendo a nivel mundial hasta llegar a México, Centro y Sudamérica, principalmente en lugares fríos y templados. Esta corriente arquitectónica hace uso de plantas crasuláceas y pastos que permiten contrarrestar los efectos térmicos de la radiación solar y el concomitante aumento de la carga térmica de los edificios (Yi-Jing y Hsien-Te, 2010).

El establecimiento de la vegetación en los techos de las construcciones se ha realizado desde la antigüedad como una práctica arquitectónica de embellecimiento y de mimetización con el ambiente. El ejemplo antiguo mundialmente conocido son los jardines colgantes de Babilonia en Mesopotamia y los jardines colgantes de Semiramis en lo que hoy es Siria (Dunnett y Kingsbury, 2004; Oberndorfer *et al.*, 2007). El registro más antiguo que se tiene de techo verde como tal, es en los países escandinavos donde fueron usados hace algunos siglos (Ayata *et al.*, 2011).

La investigación desarrollada en techos verdes se ha centrado principalmente en los beneficios que proporcionan al microclima urbano como la captación de agua de lluvia, el confort térmico en edificios y la eliminación de contaminantes del agua y del aire (Oberndorfer *et al.*, 2007). Sin embargo, se ha dejado de lado la investigación sobre las especies que pueden utilizarse en zonas tropicales, ya que los techos verdes en países fríos han sido diseñados para utilizar principalmente crasuláceas y portulacáceas por su resistencia al estrés hídrico, a altas temperaturas y a la escasez de nutrientes (Köhler y Keeley, 2005; Köhler, 2006; Emilsson, 2008). Estas especies se han utilizado sin tener en cuenta las características ambientales que diferencian una azotea del suelo,

y en muchos estudios se utiliza el término “nativo” sin una definición correcta (Butler *et al.*, 2012). En Europa, los techos verdes suelen ser sinónimo de alfombras prefabricadas de vegetación, principalmente del género *Sedum*, de una duración limitada (Emilsson, 2008), que se alejan del propósito de emular ecosistemas naturales, como es mencionado comúnmente.

Actualmente se han probado otras especies con el objetivo de mitigar la pérdida de biodiversidad en regiones urbanas (Brenneisen, 2006). Fungiendo como hábitat de colonización de herbáceas perennes, los techos verdes permiten la presencia de fauna asociada (Grant, 2006; Hobbs *et al.*, 2006; Dunnett *et al.*, 2008). Algunos pueden albergar una gama de arácnidos, escarabajos, avispas, hormigas y abejas (Grant, 2006; Kadas, 2006), e incluso especies de mayor tamaño como aves de la familia Charadriidae (Grant, 2006). Son recientes los trabajos dirigidos a la utilización de especies nativas como techo verde (Miller y Narejo, 2005; Peck, 2009). Autores que han incursionado en la utilización de plantas nativas, señalan tres razones principales: 1) Por argumentos estéticos y culturales planteados por los arquitectos paisajistas, 2) para dar más alternativas que las alfombras de césped o de *Sedum* comúnmente promovidas y 3) razones ambientales relacionadas a la conservación y aprovechamiento de especies de importancia biológica (Kephart, 2005; MacDonagh *et al.*, 2006; Lundholm y Peck, 2008; Schroll *et al.*, 2009; Butler *et al.*, 2012). Dvorak y Volder (2010) presentan una clasificación de las especies nativas utilizadas en techos verdes en Norteamérica por ecorregiones, basada en la distribución natural y la adaptabilidad climática de estas especies. Si bien esta información es valiosa para la selección de especies a utilizar en una región dada, el éxito de los diseños requiere también información de la adaptabilidad de las especies al microclima que es generado en el techo, condiciones que pueden ser diferentes a las del suelo.

Un techo verde es una estructura colocada sobre una superficie plana o inclinada, diseñada para soportar vegetación sobre una construcción, que típicamente se compone de las siguientes capas: 1) membrana anti-raíz, 2) capa de drenaje, 3) membrana filtradora, 4) sustrato y 5) vegetación (Oberndorfer *et al.*, 2007). En la actualidad hay varios tipos de techos verdes, que proporcionan funciones similares, pero están compuestos de diferentes materiales. La mayoría de los techos verdes son extensivos, con un peso de 150 a 200 kg m⁻² (Osmundson, 1999; Cantor, 2008). Otros son modulares, con poca cantidad de sustrato y un peso alrededor de 50 kg m⁻² (Köhler 2003). Por último, están los techos verdes intensivos que se caracterizan por presentar camas profundas de suelo, elementos pavimentados, pequeños cuerpos de agua y vegetación diversa, que puede incluir árboles, arbustos y plantas perennes; todo con un peso considerable que sólo es soportado por edificios con estructuras reforzadas capaces de sostener de 290 a 968 kg m⁻² (Peck y Callaghan, 1999). La inversión requerida para construir un techo verde convencional es alta, aunque suele argumentarse que a largo plazo resulta rentable debido a los beneficios que proporcionan en el ahorro de energía y longevidad del techo (Porsche y Köhler, 2003). Su costo promedio es de \$116 a \$155 USD m⁻² (Carter y Keeler, 2008).

La tendencia actual en techos verdes se basa en las innovaciones de diseño sobre techos de concreto o de soportes fuertes, debido a que su creación y expansión tecnológica fue en países europeos de climas fríos y templados, donde la capacidad de inversión puede no ser una limitante. Sin embargo, al intentar transferir esta tecnología a la vivienda rural en países en desarrollo, se debe considerar que la mayoría de techos son construidos de láminas de zinc, cartón y asbesto, y que la capacidad de inversión es escasa. De ahí la necesidad de buscar alternativas de diseño para las viviendas rústicas de zonas tropicales, que sean ligeras y de bajo costo. Ello requiere identificar plantas adecuadas para esta región climática y para la condición

microclimática específica de los techos. Por lo anterior, el presente trabajo tuvo como objetivos: 1) seleccionar especies de enredaderas con potencial para emplearse en techos verdes y 2) evaluar el desempeño de las especies seleccionadas en un prototipo de techo verde adaptado a la vivienda rural de zonas tropicales.

1.2. Materiales y métodos

La presente investigación se realizó en la región central costera de Veracruz, particularmente en las coordenadas 19°11'46.44''N - 96°20'14.69''W, con una altitud de 36 msnm. El clima en la zona es cálido subhúmedo Aw₀, según Köppen modificado por García (García 1973), con una temperatura media anual mayor de 22 °C y temperatura del mes más frío mayor de 18 °C; precipitación del mes más seco menor de 60 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55.3 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual. El estudio comprendió dos fases. La primera consistió en la identificación y calificación cualitativa de enredaderas con el mayor potencial para su uso en techos verdes, y la segunda en la evaluación del desempeño de las cinco especies con mayor potencial sobre techos modelo en condiciones de campo.

1.2.1. Primera fase.

Uno de los requisitos para que una enredadera sea usada en un techo verde es ser agradable a la vista, rápido crecimiento y mantener el follaje por largo tiempo. La búsqueda inicial de plantas idóneas se realizó en los viveros locales. Para ello, de septiembre a octubre de 2010, se entrevistó a 15 informantes clave (dueños y encargados de viveros) de la región centro de Veracruz en las comunidades de Tolome, municipio de Paso de Ovejas, Palo Gacho, municipio de Emiliano Zapata y Medellín, municipio de Medellín de Bravo. En la entrevista se preguntó acerca de

especies de enredaderas que según su criterio pudieran servir como cubierta de un techo verde. Se les pidió que calificaran cada especie mencionada, en una escala de 1-10, respecto a sus características de requerimiento de agua, rápido crecimiento, defoliación, resistencia al viento y valor económico. Además, se realizaron observaciones *in situ* de las especies señaladas por los viveristas. Por cada especie se obtuvo un valor promedio de calificación de cada criterio, así como la frecuencia de mención, que es el número de entrevistados que mencionaron la especie. Con estos datos se obtuvo el promedio general de calificación para cada especie. Las cuatro especies de mayor promedio general fueron seleccionadas para su evaluación en una segunda fase.

Adicionalmente, en abril de 2011, se realizó un recorrido de campo en las localidades de El Limón, Angostillo, Acazónica, Xochotitla, Paso Panal (municipio de Paso de Ovejas); La Puerta, Mata Cazuelas (municipio de Soledad de Doblado); Tenenexpan, Buzón, Loma de Piedra y Limones (municipio de Manlio Fabio Altamirano). En este recorrido se realizaron observaciones *in situ* de enredaderas silvestres y su potencial de uso en techos verdes. Se determinó el valor promedio general de calificación con base en sus características morfológicas, su frecuencia y su abundancia en los diferentes sitios de observación. Los lugares de observación se ubicaron a la orilla de caminos, en cercos, depresiones, parcelas, acahuales, solares y techos antiguos de casas o casas con teja. Las especies de enredaderas observadas con potencial de uso como techo verde se recolectaron para su posterior identificación en el herbario CIB del Instituto de Investigaciones Biológicas de la Universidad Veracruzana. A partir de ello, se seleccionó la especie silvestre con la mayor calificación de potencial para su uso como techo verde.

1.2.2. Segunda fase.

Se evaluó el desempeño de las cinco especies seleccionadas en la fase 1, sobre un prototipo de techo verde, comparándolas entre sí, y con dos testigos que fueron un techo verde convencional modular (crasuláceas) y un testigo sin cobertura vegetal. Las especies seleccionadas fueron *Mandevilla sanderi* (Hemsl.) Woodson (mandevilla), *Solandra maxima* (Sessé et Moc.) Ps.Green (copa de oro), *Passiflora edulis* Sims. (maracuyá), *Thunbergia alata* Bojer ex Sims. (tumbergia), y *Cissus verticillata* (L.) Noeholson & Jarvis. (tripa de vaca o manta de cielo).

Los techos modelo consistieron en estructuras de soporte a imitación de los techos de lámina de la vivienda rural. La estructura se construyó con tubo galvanizado reforzado de 2.5 cm, una lámina de zinc de 3.60 x 1.80 m, colocada a una altura de 60 cm del suelo, y 50 cm arriba de ésta se colocó un bastidor de alambre galvanizado en cuadrícula de 15 cm x 15 cm, para soporte de las enredaderas (Figura 1). Se construyeron siete estructuras que se colocaron en una explanada cubierta de pasto y expuesta al sol durante todo el día.

Junto a los costados más largos de cada techo modelo se colocaron ocho macetas donde se plantaron individuos de la misma especie (Figura 1), macetas de 12 lt, se llenaron con una mezcla de *peat moss* (PROMIX –PGX), agrolita y vermiculita en una relación de 3:1:1 como sustrato. Como testigos se utilizaron otros dos techos, uno de techo verde convencional modular con crasuláceas, plantadas en charolas de aluminio, y otro testigo sin cubierta vegetal. La asignación de cada especie a cada techo modelo fue aleatoria. El techo verde modular convencional consistió en 48 módulos de charolas de aluminio de 60 x 25 x 15 cm, perforadas por la parte inferior para facilitar drenaje en él; cada charola se colocó 3.5 kg de *peat moss* adicionados con vermiculita, agrolita y tepecil. Se colocaron 2-3 individuos de distintas especies

de crasuláceas (*Sedum compactum* Rose, *S. cupressoides* Hemsl., *S. liebmannianum* Hemsl., *S. stahlia* Solms, *S. versadense* C.H.Thomps., *Echeverria setosa* Rose & J.A.Purpus, *E. pilosa* J.A.Purpus y *Graptopetalum grande* Alexander) y las portulacáceas *Portulaca umbraticola* Kunth y *P. grandiflora* Hook, colocadas directamente sobre la lámina del techo modelo.

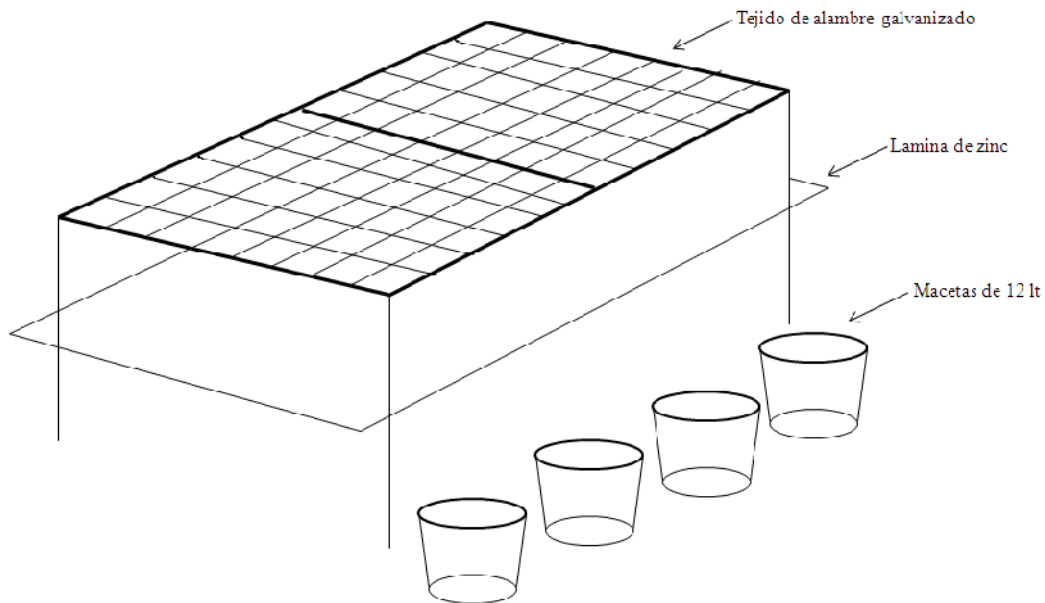


Figura 1. Estructura utilizada para la propagación de individuos y evaluación del potencial de uso de cada especie.

Manejo de las plantas. Después de dos meses de sembrar las plantas, se fertilizaron con 25 gr de triple 17 y 15 gr de urea por maceta, haciendo aplicaciones cada dos semanas.

1.2.3. Variables registradas.

Del 31 de marzo al 30 de septiembre de 2011, se registró semanalmente: 1) la longitud de las plantas (cm), definida como la sumatoria de las longitudes del tallo principal y sus ramificaciones; 2) número de hojas presentes; 3) cobertura del bastidor, 4) porcentaje de la superficie cubierta del bastidor, 5) peso seco de la hojarasca acumulada sobre la lámina. Al

término de la evaluación se registró el peso de la biomasa soportada por el bastidor. La temperatura de la lámina de los techos prototipo se registró con *Data loggers* (USB-500) colocados 5 cm por debajo de la lámina, uno por techo. Los registros se hicieron cada 30 minutos, a partir de que al menos una de las especies alcanzó el 100% de cobertura del bastidor hasta el término de la evaluación (16 septiembre al 13 de diciembre de 2011). Para determinar el peso de la biomasa en pie soportada por el bastidor, una vez que se alcanzó el 100% de cobertura se colectó y pesó en fresco todo el follaje presente en cuatro muestras aleatorias de 25 x 25 cm.

Análisis estadísticos.- Con base en los registros de longitud de las plantas se calculó la tasa de crecimiento absoluta (TAC) mensual para cada especie. Se compararon estadísticamente las TAC promedio de septiembre, utilizando pruebas no paramétricas debido a que no se cumplieron los criterios de normalidad y homogeneidad de varianzas para esta variable. Se realizó un análisis de varianza con un criterio de clasificación sobre los rangos de TAC, utilizando el PROC ANOVA de SAS v. 9.3 (SAS, 2010) y posteriormente se compararon dos pares de especies mediante la prueba de Wilcoxon para dos muestras utilizando el PROC NPAR1WAY de SAS v. 9.3 (SAS, 2010) y utilizando un nivel de significancia de 0.025 para mantener 0.05 el α global.

Para determinar si hubo una reducción significativa en las temperaturas de los techos, atribuible al tipo de cobertura respecto al testigo, se tomaron en cuenta los registros de las temperaturas más altas correspondiendo a las horas de las 11:30 a las 17:30. A fin de evitar la autocorrelación, se tomaron muestras aleatorias de ocho días por mes, de donde se calculó la temperatura diaria promedio y la diferencia de temperatura promedio respecto al testigo. Estas dos variables fueron sometidas a análisis de varianza de bloques al azar con cuatro repeticiones, siendo el mes el criterio de bloqueo, y se compararon mediante la prueba de medias de Tukey HSD con α del

0.05, considerando la corrección de Bonferroni. Para ello se utilizó el PROC ANOVA de SAS v.9.3 (SAS, 2010).

1.3. Resultados

1.3.1. Primera fase.

En base a la opinión de los entrevistados se determinaron 22 especies con potencial de uso para techos verdes (Cuadro 1). La calificación promedio más alta la obtuvieron *S. maxima*, *P. edulis*, *M. sanderi* y *T. alata*. Del recorrido de campo se determinaron cuatro especies silvestres, de las cuales *C. verticillata* tuvo el mayor promedio general de calificación (Cuadro 2). Así, las especies seleccionadas para su evaluación en una segunda fase fueron: *Solandra maxima*, *Passiflora edulis*, *Mandevilla sanderi* y *Thunbergia alata* y *Cissus verticillata*.

Cuadro 1. Listado de especies obtenidas en las entrevistas con las calificaciones asignadas por los viveristas.

| Nombre científico | Crecimiento | Permanencia de Follaje | Tolerancia a altas temperaturas | Baja demanda de agua | Tolerancia al viento | Costo planta | Frecuencia de mención | Promedio |
|--|-------------|------------------------|---------------------------------|----------------------|----------------------|--------------|-----------------------|----------|
| <i>Mandevilla sanderi</i> (Hemsl.) | 9.2 | 9.2 | 9 | 7.6 | 8.4 | 7.5 | 15 | 9.41 |
| <i>Passiflora edulis</i> Sims. | 10 | 9.2 | 9.5 | 7.3 | 7.6 | 8.3 | 13 | 9.27 |
| <i>Solandra maxima</i> (Sessé et Moc.) | 9 | 9.2 | 9.1 | 5.3 | 8 | 7.5 | 14 | 8.87 |
| <i>Thunbergia alata</i> Bojer ex Sims | 9.4 | 9.3 | 9.2 | 8.1 | 7.8 | 8 | 10 | 8.82 |
| <i>Allamanda violacea</i> A. DC. | 9 | 9.2 | 8.2 | 8.2 | 8 | 7.1 | 12 | 8.81 |
| <i>Trachelospermum jasminoides</i> (Lindl.) Lem. | 10 | 8.5 | 8.2 | 6.2 | 6.3 | 10 | 7 | 8.02 |
| <i>Lysimachia nummularia</i> L. | 9.6 | 7.8 | 9.2 | 5.3 | 7.5 | 8 | 8 | 7.94 |
| <i>Bougainvillea glabra</i> L. | 6.8 | 8.3 | 8.5 | 7.6 | 7.2 | 8 | 9 | 7.91 |
| <i>Passiflora caerulea</i> L. | 10 | 9 | 9 | 8 | 8 | 9 | 1 | 7.71 |
| <i>Sechium edule</i> (Jacq.) Sw. | 9.6 | 4.2 | 7.5 | 7.8 | 6.2 | 9.5 | 8 | 7.54 |
| <i>Phaseolus heterophyllus</i> Willd. | 9 | 9 | 8 | 9 | 6 | 10 | 1 | 7.42 |
| <i>Monstera deliciosa</i> Liebm. | 6.5 | 9.5 | 9 | 7.5 | 7.5 | 8 | 2 | 7.14 |
| <i>Glechoma hederacea</i> L. | 9 | 8.5 | 7.5 | 7.5 | 8 | 7.5 | 2 | 7.14 |
| <i>Ipomoea tricolor</i> Cav. | 9 | 8 | 8 | 7 | 7 | 10 | 1 | 7.14 |
| <i>Hedera helix</i> L. | 8.2 | 8.4 | 9.2 | 5.3 | 7.5 | 6.8 | 4 | 7.05 |
| <i>Vitis vinifera</i> L. | 9.2 | 7.8 | 7.7 | 7.3 | 7.7 | 6.25 | 3 | 6.99 |
| <i>Philodendron scandens</i> K. Koch & Sello | 7.6 | 8.5 | 8.2 | 5 | 7.3 | 6.2 | 6 | 6.97 |
| <i>Scindapsus aureus</i> (Linden & André) Engl. | 8 | 9 | 8 | 7 | 3 | 10 | 1 | 6.57 |
| <i>Jasminum grandiflorum</i> L. | 4 | 10 | 8 | 7 | | 8 | 1 | 6.33 |
| <i>Bignonia capreolata</i> L. | 7 | 8 | 9 | 5 | 7 | 7 | 1 | 6.28 |

*Cada valor es el promedio de total de personas entrevistadas

Cuadro 2. Listado de las especies identificadas en campo con atributos para usarse en techos verdes.

| | | EL | ANG | ACA | XCA | PP | LP | MC | TNX | BZ | LM | LI | Prom. | Promedio general |
|--|---------------------|----|-----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|----|----|-------|------------------|
| <i>Cissus verticillata</i> (L.) Nicolson & Jarvis | Presencia | 1* | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.5 | 1.52 |
| | Abundancia | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.81 | |
| | Tamaño de las hojas | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.27 | |
| <i>Serjania goniocarpa</i> Radlk. | Presencia | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2.7 | 1.47 |
| | Abundancia | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1.18 | |
| | Tamaño de hojas | 1 | 1 | 1 | 0.5 | 0.5 | 0 | 0 | 0.5 | 0.5 | 0 | 1 | 0.54 | |
| <i>Antigonon leptopus</i> Hook. & Am. | Presencia | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1.5 | 1.01 |
| | Abundancia | 2 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0.63 | |
| | Tamaño de las hojas | 2 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 | 0.90 | |
| <i>Pithecoctenium crucigerum</i> (L.) A.H. Gentry | Presencia | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.6 | 0.44 |
| | Abundancia | 0 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.36 | |
| | Tamaño de las hojas | 0 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.36 | |

EL = El Limón, ANG = Angostillo, ACA = Acazonica, XCA = Xocotitla, PP = Paso Panal, LP = La Puerta, MC = Mata Cazuelas, BZ = Buzón, LM = Loma de Piedra, LI = Limones. *La escala es de 1 a 4, donde 1 es el menor valor.

1.3.2. Segunda Fase.

Al inicio del experimento las plantas sufrieron estrés, manifestado en una defoliación parcial y total en otros casos y una nula tasa de crecimiento. Esto debido a las altas temperaturas presentadas durante los días de abril a mayo de 2010, propias de un clima Aw_0 . Después de tres semanas de colocadas las plantas, *C. verticillata*, única especie que no sufrió defoliación, creció aceleradamente, seguido por *S. maxima*. En menor grado crecieron *M. sanderi* y *T. alata*, manifestando dificultad para adaptarse a las condiciones ambientales del sitio. El crecimiento de *P. edulis* fue reducido debido a la defoliación por estrés y el daño causado por el ataque constante de larvas de lepidópteros. Al cabo de seis meses, la especie con mayor crecimiento en longitud y número de hojas fue *C. verticillata* (Figuras 2 y 3). Esta especie tuvo una tasa de crecimiento significativamente más alta que *T. alata* y que *S. maxima* (Figura 4); *M. sandieri* y *P. edulis* fueron excluidas del análisis por haber presentado tasas de crecimiento nulas. Por otra parte, sólo *C. verticillata* alcanzó la cobertura total del bastidor, mientras que *T. alata* y *S. maxima* cubrieron el 22 y 46%, respectivamente

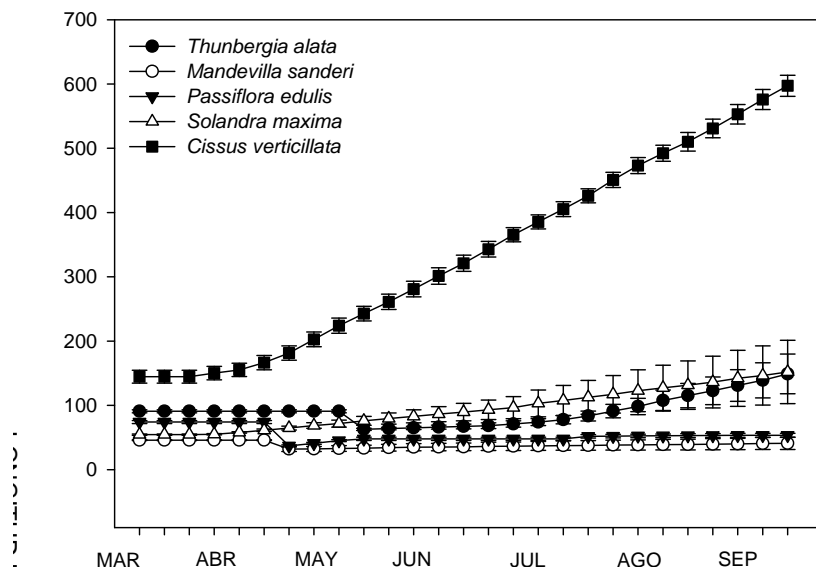


Figura 2. Longitud promedio (n=8, por especie) del tallo de las plantas evaluadas del 31 de marzo al 30 de septiembre de 2011.

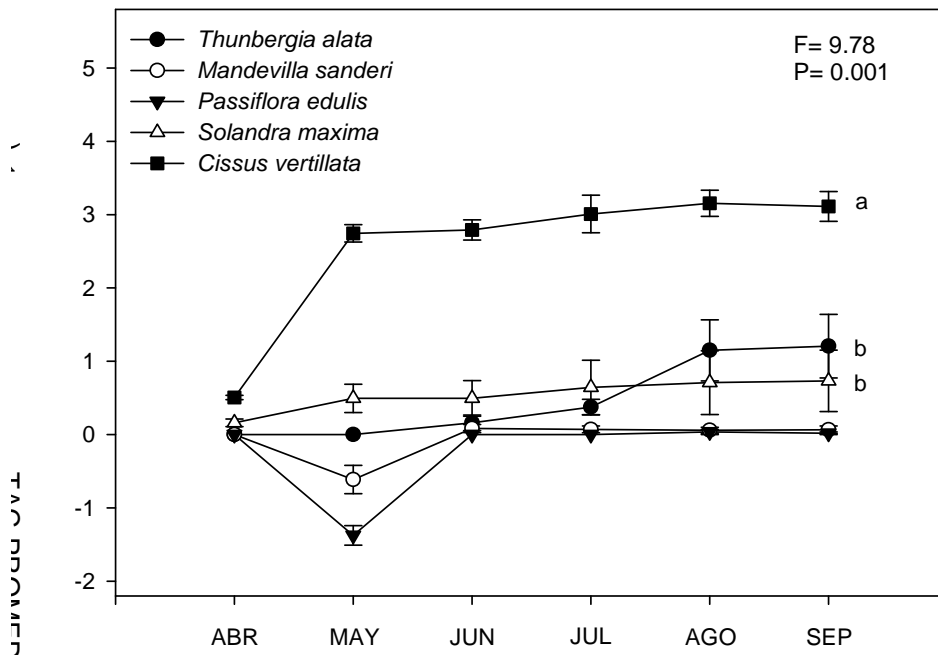


Figura 3. Promedios mensuales (n=8 por especie) de la tasa absoluta de crecimiento (TAC) (cm día⁻¹) por especie. Símbolos correspondientes a septiembre y señalados con diferente letra, fueron estadísticamente diferentes ($P < 0.025$) según pruebas de Wilcoxon para pares de muestras. Símbolos sin letra no fueron incluidos en el análisis.

La cantidad de hojarasca acumulada sobre la lámina del techo sólo pudo cuantificarse en *C. verticillata* y *S. maxima*. Esta última presentó un promedio de acumulación semanal de 60.77 g (± 7.25 DE) de hojarasca compuesta principalmente de flores y de difícil remoción puesto que tendieron a adherirse a la lámina del techo. *C. verticillata* por su parte tuvo un promedio de acumulación semanal de 9.22 g (± 1.25 DE) de hojarasca en su mayoría partes de tallos y hojas de fácil remoción. El peso promedio de la cubierta de *C. verticillata* fue de 0.924 kg m⁻² (± 0.011 DE), mientras que el del techo convencional fue de 25.92 kg m⁻² (± 2.31 DE). De las otras especies no se obtuvo el peso porque no alcanzaron el 100% de cobertura.

La mayor reducción de la temperatura del techo se obtuvo con *C. verticillata*, que fue significativamente menor que el testigo sin cobertura vegetal, seguida por el techo convencional y *S. máxima* (Figura 5). Las temperaturas promedio de los techos oscilaron entre 29.9 y 31.8 °C, siendo significativamente menores las del techo cubierto por *C. verticillata* (Figura 6).

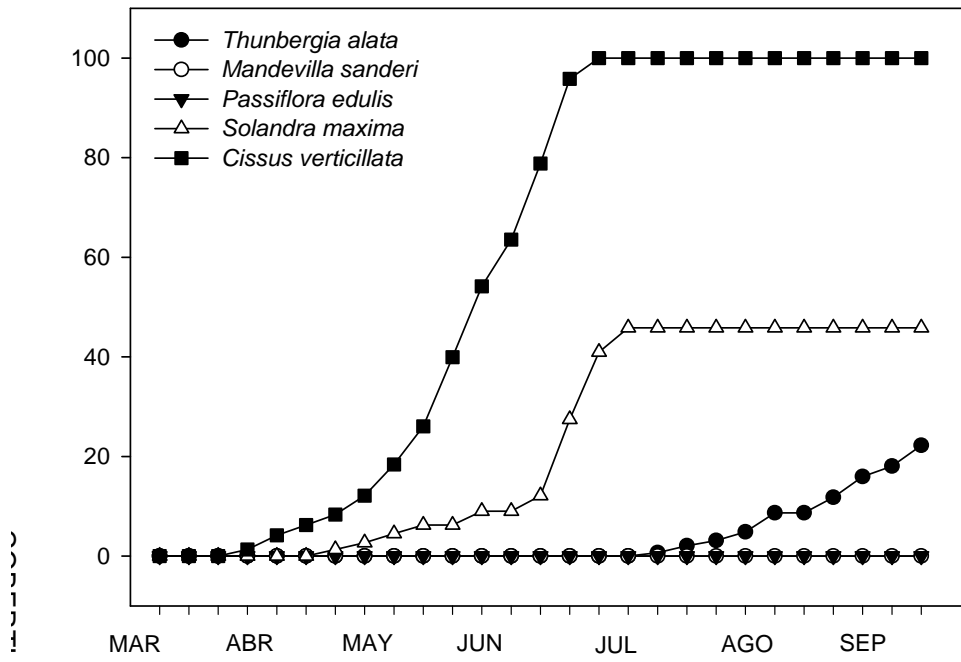


Figura 4. Cobertura del bastidor (%) para las distintas especies en estudio.

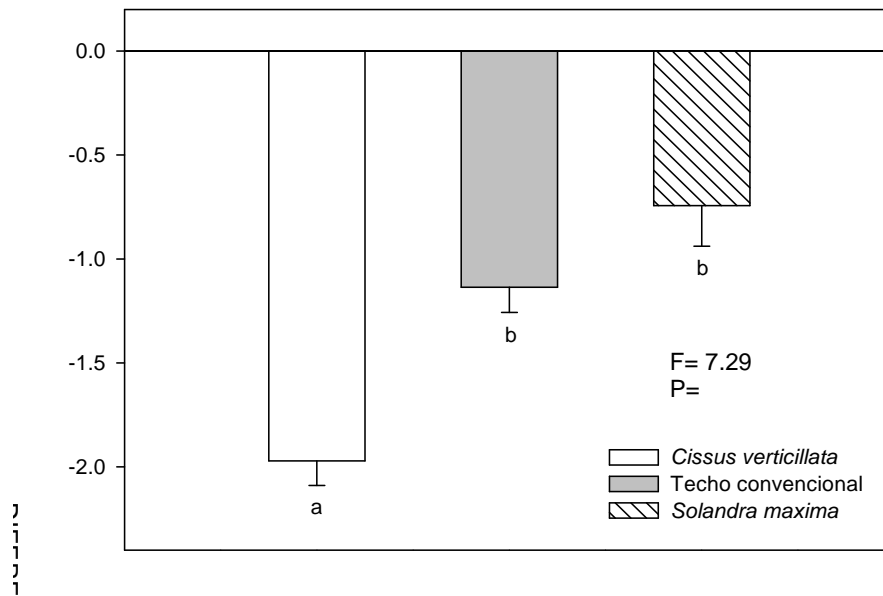


Figura 5. Diferencia diaria promedio (n=4) de la temperatura (°C) de distintos techos verdes, respecto al testigo. Letras diferentes señalan diferencias significativas (α de 0.05) entre tipos de cubierta, de acuerdo con la prueba de Tukey HSD.

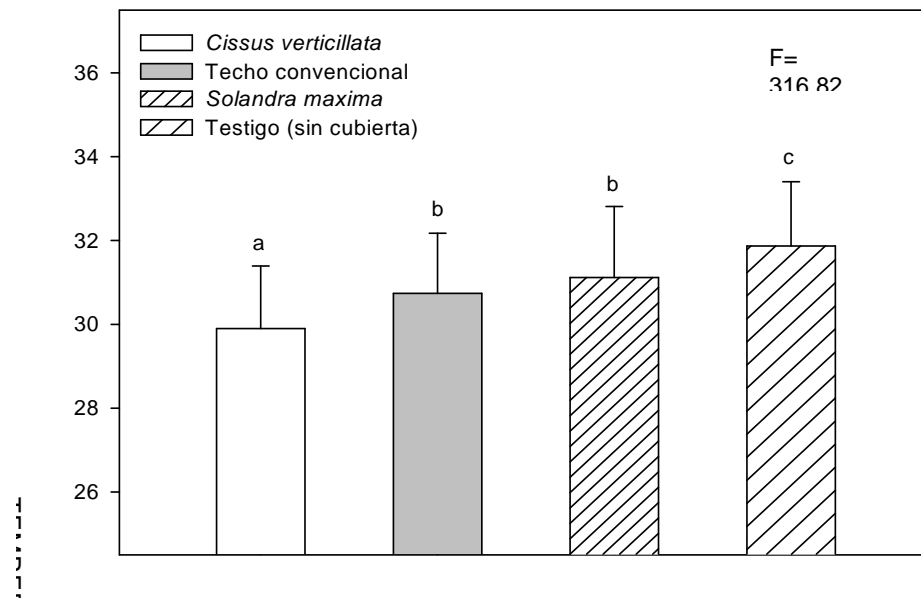


Figura 6. Temperatura media diaria (°C) debido a la cobertura de las diferentes especies vegetales utilizadas como techo verde y el testigo. Letras diferentes señalan diferencias significativas (α de 0.05) entre tipos de cubierta, de acuerdo con la prueba de Tukey HSD.

1.4. Discusión

Las innovaciones en techos verdes son frecuentes, si bien se mantienen dentro los lineamientos de la Guía de Planeación, Ejecución y Mantenimiento de Techos Verdes (Oberndorfer *et al.*, 2007; Dvorak y Volder, 2010), enfocadas a climas templados y fríos. En nuestro estudio, la innovación es orientada a un prototipo de estructura que se coloca sobre techos de lámina de zinc y de cartón, típicos de la vivienda rural tropical, y que difícilmente soportarían un techo verde convencional. Por ello, se pensó en una cubierta vegetal con otro tipo de plantas, en este caso de enredaderas tropicales, y en la evaluación de su adaptación al ambiente local y al microambiente generado por el techo, expresada en las diferencias observadas en su crecimiento. Además, dicha cubierta vegetal debe ser de un crecimiento rápido, de tallos fuertes pero flexibles, de poco peso, resistente a altas temperaturas y a los fuertes vientos y al estrés hídrico, poca defoliación, requerimientos bajos de nutrientes y un mínimo mantenimiento.

De acuerdo con los resultados de la primera fase de investigación, existe un vergel de especies con potencial de uso para techos verdes para regiones tropicales con un clima Aw₀. De dicha gama destacan: *Solandra maxima*, *Passiflora edulis*, *Mandevilla sanderi* y *Thunbergia alata*, especies de uso común en la zona centro de Veracruz y propagadas en viveros locales. Así también, destacan enredaderas silvestres ruderales como: *Cissus verticillata* (tripa de vaca o manta de cielo), *Serjania goniocarpa* (enredadera de nueve hojas), *Antigonon leptopus* (flor de San Pedro) y *Pithecoctenium crucigerum* (peine de mono).

Aunque las especies antes mencionadas presentan un potencial de uso en techos verdes, no todas cumplieron los requerimientos necesarios para ser utilizadas como un techo verde en zonas

rurales tropicales, ya que algunas presentaron estrés a las condiciones ambientales y al manejo humano o incluso presiones biológicas. De las cinco especies evaluadas, únicamente *C. verticillata* reunió las exigencias necesarias de crecimiento, producción de hojas, cobertura del bastidor, facilidad de manejo, defoliación y la reducción de temperatura de techos modelo; características importantes ya que un techo verde en una zona rural tropical debe construirse en poco tiempo y la especie debe ser resistente a la exposición solar constante y altas temperaturas.

Respecto al amortiguamiento térmico brindado por los diferentes tipos de techo, *C. verticillata* presentó los mejores resultados, ya que la reducción de temperatura fue de hasta 3 °C, incluso mejor que el techo convencional de crasuláceas y portulacáceas. Sin embargo, los resultados obtenidos son menores a los reportados por Liu y Baskaran (2003), De Nardo *et al.*, (2005) y Wanphen y Nagano (2009), quienes determinaron una disminución de temperatura de 5-9 °C, con la implementación de techos verdes convencionales, en climas con temperaturas ambiente de 42 - 47 °C. Los resultados presentados aquí corresponden al periodo de otoño, que en los climas Aw₀ suelen presentar una temperatura media menor que en primavera y verano. Queda por verificar si en esas épocas el amortiguamiento térmico sea mayor, por la menor variabilidad en temperatura que presentan los techos verdes respecto de los techos sin cubierta.

Nuestros resultados indican que la enredadera silvestre *C. verticillata* presenta una serie de características que la hacen idónea para su uso en techos verdes adaptados a la vivienda rural del trópico cálido subhúmedo. Sin embargo, por ser una especie silvestre poco conocida, se hace necesario desarrollar más investigación sobre numerosos aspectos para su cultivo, propagación y cuidado, a fin de que su uso potencial sea adecuado.

1.5. Literatura citada

- Ayata T., Tabares-Velasco O. y Srebric J. 2011. An investigation of sensible heatfluxes at a green roof in a laboratory setup. *Building and Environment* **46**:1851–1861.
- Butler C., Butler E. y Orians C. M. 2012. Native plant enthusiasm reaches new heights: Perceptions, evidence, and the future of green roofs. *Urban Forestry & Urban Greening Forestry* **11**: 1-10.
- Cantor S. 2008. *Green Roofs in Sustainable Landscape Design*. Norton. New York. USA.
- Carter T. y Keeler A. 2008. Life cycle cost-benefit analysis of extensive vegetated roof systems. *Journal of Environmental Management* **87**: 350-363.
- De Nardo J.C., Jarrent A.R., Manbeck H.B., Beattie D.J. y Berghage R.D. 2005. Stormwater mitigation and surface temperature reduction by green roofs. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* **48**: 1491–1496.
- Dunnett N. y Kingsbury N. 2004. *Planting Green Roofs and Living Walls*. Timber Press. Portland. USA.
- Dunnett N., Nagase A., Booth R. y Grime P. 2008. Influence of vegetation composition on runoff in two simulated green roof experiments. *Urban Ecosystems* **11**:385-398.
- Dvorak B. y Volder A. 2010. Green roof vegetation for North American ecoregions: a literature review. *Landscape and Urban Planning* **96**:197-213.
- Emilsson T. 2008. Vegetation development on extensive vegetated green roofs: influence of substrate composition, establishment method and species mix. *Ecological Engineering* **33**:265-277.
- García E. 1973. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., México.
- Grant G. 2006. Extensive green roofs in London. *Urban Habitats* **4**:51-65.
- Hobbs R.J., Arico S., Aronson J., Baron J.S., Bridgewater P., Cramer V.A., Epstein P.R., Ewel J.J., Klink C.A., Lugo A.E., Norton D., Ojima D., Richardson D.M., Sanderson E.W., Valladares F., Vila M., Zamora R. y Zobel M. 2006. Novel ecosystems: theoretical and management aspects of the new ecological world order. *Global Ecology and Biogeography*. **15**:1-7.
- Kadas G., 2006. Rare invertebrates colonizing green roofs in London. *Urban Habitats* **4**:66-73.
- Kephart P. 2005. Living architecture – an ecological approach. Paper presented at the Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference, Washington, DC. USA.

- Köhler M. 2003. Plant survival research and biodiversity: Lessons from Europe. Memories of the First Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference, Awards and Trade Show. 20-30 May. Chicago, USA.
- Köhler M. 2006. Long-term vegetation research on two extensive green roofs in Berlin. *Urban Habitats* 4:3–26.
- Köhler M. y Keeley M. 2005. *The green roof tradition in Germany: The example of Berlin*. In Hoffman L y McDonough W. (eds.). *Green Roofs: Ecological Design and Construction*. Schiffer Press. New York. USA. Pp. 108–112.
- Liu K. y Baskaran B. 2003. Thermal performance of green roofs through field evaluation—Ottawa, National Research Council Canada, Institute for Research in Construction, Ottawa (Canada) Report no. NRCC-46412.
- Lundholm T. y Peck S.W. 2008. Introduction: Frontiers of green roof ecology. *Urban Ecosystems* 11:335-337.
- MacDonagh L.P., Hallyn, N.M. y Rolph S. 2006. Midwestern USA plant communities + design = bedrock bluff prairie green roofs. Memories of the Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference, Boston, USA.
- Miller C. y Narejo D. 2005. State of the green roof industry in the United States. Memories of the Geosynthetics Research and Development in Progress Congress (GRI 18) Austin.
- Oberndorfer E., Lundholm J., Bass B., Coffman R. R., Hoshi H., Dunnett N., Gaffin S. y Rowe B. 2007. Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions and services. *BioScience* 57:823-833.
- Osmundson T. 1999. *Roof Gardens - History, Design and Construction*, W.W. Norton & Company, Inc. New York.
- Peck S.W. 2009. *Toronto City Council Adopts Mandatory Green Roof Requirements*. Green Roofs for Healthy Cities. Toronto, Canada.
- Peck S.W. y Callaghan, C. 1999. *Greenbacks from green roofs: forging a new industry in Canada*. Prepared for: Canada mortgage and housing corporation, Environmental Adaptation Research Group, Environment Canada.
- Porsche U. y Köhler M. 2003. Life cycle costs of green roofs: A comparison of Germany, USA, and Brazil. Proceedings of the World Climate and Energy Event. Rio de Janeiro. Brasil.
- SAS. 2010. Statistical Analysis System, Enterprise Guide v 4.3.0. SAS Institute, Inc., Cary, North Carolina. USA.
- Schroll E., Kambrinos J., Righetti T. y Sandrock D. 2009. The role of vegetation in regulating storm water runoff from green roofs in a winter rainfall climate. *Ecological Engineering* 37:595–600.

- Wanphen S. y Nagano K. 2009. Experimental study of the performance of porous materials to moderate the roof surface temperature by its evaporative cooling effect. *Building and Environment* **44**: 338-351
- Yi-Jing L. y Hsien-Te L. 2010. Thermal performance of different planting substrates and irrigation frequencies in extensive tropical rooftop greeneries. *Building and Environment* **46**: 345-355.

CAPITULO II. PROTOTIPO DE UN TECHO VERDE CON ENREDADERAS TROPICALES PARA LA VIVIENDA RURAL Y SU CONFORT TÉRMICO

Resumen

Los techos verdes cada vez más se convierten en una alternativa arquitectónica que ha tomado auge debido a que brindan un efecto de reducción de calor en zonas de temperaturas elevadas y disminuyen el gasto energético por la reducción de sistemas de enfriamiento. Por ello es una tecnología deseable en zonas cálidas y tropicales. El objetivo fue evaluar en campo, el confort térmico (CT) brindado por un prototipo de techo verde diseñado con la enredadera nativa *Cissus verticillata*, y adaptado a la vivienda rural de trópico subhúmedo mexicano. Se comparó el confort térmico y la temperatura bajo la lámina del techo de habitaciones con y sin el prototipo de techo verde diseñado con *C. verticillata*, en tres viviendas de Angostillo, Veracruz. Se usó como indicadores de confort el Voto Medio Predicho (VMP), la Proporción de Personas a Disgusto (PPD), y el Voto Subjetivo (VS) de dos grupos evaluadores. El VMP, la PPD y el VS fueron mayores ($P < 0.01$, $P < 0.01$, y $P < 0.0001$, respectivamente) en las habitaciones sin techo verde indicando un menor confort en éstas. Asimismo, la temperatura promedio bajo la lámina de las habitaciones con techo verde fue hasta 4 °C menor ($P < 0.05$). Se concluye que el prototipo de techo verde diseñado con *C. verticillata* mejoró el confort térmico de las viviendas rurales evaluadas.

Palabras clave: voto subjetivo, voto medio predicho, proporción de personas a disgusto, trópico.

PROTOTYPE OF A GREEN-ROOF WITH TROPICAL VINES FOR THERMAL COMFORT IN RURAL HOUSES

Abstract

The use of green-roofs as an architectural alternative is becoming more popular because of their cooling effect on buildings and the related reduction in energy consumption. Such a technology is desirable in tropical zones. The objective of this study was to evaluate the thermal comfort (TC) provided by a green-roof prototype using the native vine *Cissus verticillata*, and adapted to the conditions of rural housing in Mexico's tropical sub-humid climate. Thermal comfort and temperature in rooms of houses with and without the green-roof prototype with *C. verticillata* were measured and compared among three houses in Angostillo, Veracruz. The indicators of comfort used were the Predicted Mean Vote (PMV), the Percentage of Persons Dissatisfied (PPD), and the Subjective Vote (SV) of two evaluated groups. The PMV, PPD, and SV were higher ($P < 0.01$, $P < 0.01$, and $P < 0.0001$, respectively) in rooms without green-roofs, indicating less comfort and temperatures in rooms under green-roofs were up to 4°C lower ($P < 0.05$). The green-roof prototype using *C. verticillata* improved thermal comfort in the evaluated rural houses.

Key words: subjective vote, mean predicted vote, percentage of persons dissatisfied, tropics.

2.1. Introducción

Los techos verdes, al tener una capa vegetativa y otras distintas capas de contención y de protección, ofrecen una serie de beneficios como son el alargamiento de vida del techo (Saiz *et al.*, 2006; Kosareo y Ries, 2007), la disminución de escorrentía por las aguas pluviales (De Nardo *et al.*, 2003; Van Woert *et al.*, 2005), aislamiento del ruido y captación de contaminantes y polvos (Van Renterghem y Botteldooren de 2008; Yang *et al.*, 2008), el aislamiento térmico y la reducción de la temperatura dentro de las casas (Wong *et al.*, 2003a). Este último beneficio toma gran importancia en las zonas cálidas y tropicales, ya que es común que experimenten un aumento de temperatura considerable dentro de las casas en verano (ROOFSOL, S.F.).

El enfriamiento de los techos verdes se induce por la sombra que se genera sobre la estructura de soporte, así como también por la evapotranspiración que ocurre en la capa vegetativa, la cual capta la mayor parte de la radiación solar (Del Barrio, 1998; Wong *et al.*, 2003b), lo que disminuye su temperatura y también minimiza las fluctuaciones de calor (Teemusk y Mander, 2010). Del total de la radiación solar que llega al techo, aproximadamente el 27% se refleja, el 60% es absorbido por las plantas y el suelo, y únicamente el 13% se transmite y llega la estructura de soporte o techo (Ekaterini y Dimitris, 1998; Tabares-Velasco y Srebric, 2009).

Actualmente, los estudios de disminución de temperatura con techos verdes, están encaminados a contrarrestar problemas como el efecto de la isla de calor, presente en las grandes zonas urbanas (una elevación de la temperatura con respecto a las áreas rurales circundantes o naturales, debido a la alta concentración de calor que absorben superficies oscuras tales como techos y pavimentos) (Thompson, 1998; Peck *et al.*, 1999; Takebayashi y Moriyama, 2007). El calor absorbido por las

superficies duras es liberado en las zonas circundantes, disminuyendo en gran medida los niveles de CT (Simmons *et al.*, 2008); el aumento de temperatura que puede existir por este efecto, puede ser de 4 a 5 °C (Teemusk y Mander, 2010).

Es relevante la cantidad de estudios que se generan con respecto al amortiguamiento térmico y la reducción de temperatura dentro de las casas (Del Barrio, 1998; Niachou *et al.*, 2001). Se ha determinado una disminución de temperatura de entre 5 y 9 °C con la implementación de techos verdes, en ambientes con temperaturas máximas de 47 °C y una media de 44 °C (Lui y Baskaran, 2003; De Nardo *et al.*, 2005; Wanphen y Nagano, 2009).

Uno de los objetivos de la disminución de temperatura por medio de los techos verdes es brindar un mayor confort térmico a las personas. Éste es definido como aquella condición mental que expresa satisfacción con el ambiente térmico (ISO 7730, 1995). En la operacionalización del cálculo del confort térmico intervienen seis variables: la tasa metabólica, el aislamiento de la ropa, la temperatura del aire, la temperatura radiante, la velocidad de aire y la humedad en un espacio de tiempo (ASHRAE, 1992). De entre esas variables, los de techos verdes contribuyen a la reducción de la temperatura del aire y la temperatura radiante.

El aumento de temperatura y pérdida del confort térmico no se restringe sólo a las zonas urbanas, sino también las zonas rurales presentan problemas de elevación de temperatura dentro de las casas, debido a que los patrones y procesos de calentamiento global están influyendo en las tendencias actuales de temperaturas (Currit y Easterling, 2009). Los árboles y arbustos en los solares familiares que protegen las casas de la radiación solar se están perdiendo (Mas *et al.*, 2004), y el tipo de construcción ha pasado de ser casas con techos altos de materiales ligeros y

frescos (hojas de palma, lámina de cartón, teja), a techos de poca altura con materiales que absorben el calor (lámina de zinc y concreto), por lo que la implementación de techos verdes puede ser una medida de mitigación calórica.

En los últimos 40 años un gran número de investigadores ha centrado sus trabajos en estudios de CT para ambientes cálidos y tropicales (Feriadi y Wong, 2004). Como resultado, se han generado distintos estándares, siendo el ASHRAE estándar 55 (ASHRAE, 1992) y el ISO7730 (ISO7730, 1995), los estándares internacionales de confort térmico más usados. Al respecto dichos estándares es especificar las combinaciones de factores térmicos ambientales de los interiores y los factores personales que producirán las condiciones térmicas ambientales aceptables para la mayoría de los ocupantes dentro del espacio (ASHRAE, 1992). Los factores ambientales abordados en este estándar son la temperatura del aire, temperatura radiante, humedad y velocidad del aire, mientras que los factores humanos son actividad metabólica y el aislamiento de ropa. Se pretende que todos los criterios en esta norma sean aplicados juntos para poder determinar la presencia o ausencia del confort térmico en el ambiente interior, ya que este responde a la interacción de todos los factores que antes mencionados (ASHRAE, 1992). Debido a que existen grandes variaciones, tanto fisiológicas como psicológicas, de persona a persona, es difícil satisfacer a todo el mundo en un espacio.

Para calcular el confort térmico tomando en cuenta los factores ambientales y humanos, se genera el voto medio predicho (PMV), índice que predice el valor medio de la sensación humana por medio de datos medioambientales conjugados con datos fisiológicos de un grupo de personas en un ambiente determinado y que puede ser considerado como una medida objetiva del confort. A partir dicho cálculo se desprende el porcentaje de personas a disgusto (PPD), refiriéndose a la

cantidad de personas a disgusto con la temperatura del sitio (Kvisgaard, 1997). Asimismo existe el voto subjetivo observado que proviene de la calificación asignada a un intervalo de sensación térmica de 7 puntos, desde - 3 (frío) a +3 (caliente), donde el 0 representa una sensación térmica neutra, donde la mayoría de las personas se encuentran a gusto con la temperatura de un sitio (Kvisgaard, 1997).

Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue determinar, en campo, el confort térmico brindado por un prototipo de techo verde con enredaderas nativas adaptado a la vivienda rural de trópico subhúmedo mexicano en la zona central del estado de Veracruz.

2.2. Materiales y métodos

La presente investigación se realizó de abril a septiembre de 2011 en la comunidad de Angostillo, municipio de Paso de Ovejas, Veracruz, localizado geográficamente en las coordenadas 19°13'01.61'' latitud N y 96°32'36.79 longitud O, con una altura de 266 msnm. El clima del sitio, según la clasificación de Köppen modificada por García (1973), es del tipo $Aw_0''(w)(i)g$, que es el más seco de los cálidos subhúmedos, con lluvias en verano, temperatura media anual de 25 °C y precipitación estacional, con una media anual no mayor a 1000 mm. La vegetación original fue selva baja caducifolia y en la actualidad el paisaje es un mosaico de vegetación secundaria (acahuales) de selva baja caducifolia, áreas de cultivo, potreros inducidos y acahuales. Los tipos de suelos predominantes en su denominación local son barrial, tierra negra, tierra amarilla, y cascajillo, arenosos poco profundos, pedregosos y con bajo contenido de materia orgánica (López, 2008).

Las casas de la localidad de Angostillo se caracterizan por ser de paredes de ladrillo o block, con techos en su mayoría de lámina de zinc, seguidos por techos de concreto y solo en algunos casos lámina de asbesto. Por lo general cuentan con un área común o sala y de uno a dos habitaciones, teniendo por lo general la cocina en la parte trasera de la casa siendo una mera extensión ya que muchas veces simplemente es una estufa de leña. El solar o patio se encuentra tanto en la parte delantera como trasera conteniendo en estos, algunos árboles frutales, plantas de ornato y condimenticias.

Construcción de los techos verdes. El prototipo de techo verde adaptado a la vivienda rural tropical, consiste en una estructura de soporte para el crecimiento de enredaderas nativas, a 50 cm por arriba de la lámina de techo de la casa. Dicha estructura se construyó con un PTR liviano sobre la que descansa un bastidor de cuatro por cuatro metros e cual sirvió de guía y soporte de las enredaderas. Éstas se colocaron en macetas de 12 litros dispuestas, mediante repisas externas, alrededor de la habitación a una altura media para su facilidad de regado y abonado (Figura 7). Cada maceta contenía una planta y un tutor de bambú a fin de conducir el crecimiento de la enredadera hacia el bastidor del techo verde.

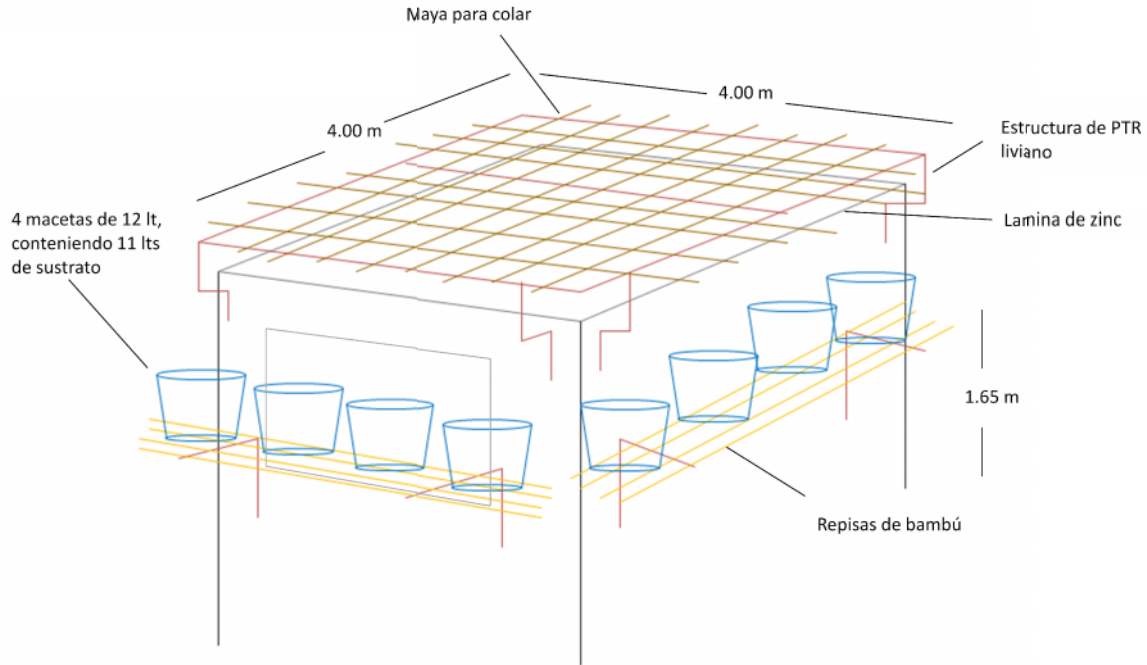


Figura 7. Diseño del prototipo de techo verde.

Se seleccionaron tres casas de Angostillo de acuerdo con las siguientes características: 1) techos de lámina zinc, 2) con orientación de Este a Oeste, 3) cercanas entre ellas, 4) que dispusieran de dos habitaciones separadas pero de dimensiones y orientación semejantes, 5) cuyos propietarios quisieran colaborar, 6) que las personas estuvieran de acuerdo a modificar sus casas, y 7) que las personas se comprometieran a llevar un regado y abonado de las plantas. En cada casa se seleccionó al azar una de las dos habitaciones y sobre ésta se construyó el techo verde de acuerdo con la descripción anterior y utilizando como enredadera la especie *Cissus verticillata* (L.) Noeholson & Jarvis de acuerdo con los resultados del capítulo anterior de esta tesis. Las características específicas las casas y habitaciones se describen en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Características de la flora, infraestructura colocada y de las habitaciones con el prototipo de techo verde

| | Casa 1 | Casa 2 | Casa 3 |
|--|---------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| Dimensiones de las habitaciones | 4 x 4 m | 3.85 x 2.15 m | 3.60 x 4 m |
| Altura del techo | 2.20 m | 2.10 m | 2.35 m |
| No. de macetas | 8 | 7 | 8 |
| Tipo de sostén de macetas | 2 Repisas de bambú fijadas a la pared | 1 Repisa de bambú fijada a la pared | 2 Repisas sostenidas en el suelo |
| Altura de colocación de datalogger. | 1.85 m | 1.65 | 1.50 |

El sustrato que se utilizó fue una mezcla de peat moss Floraska, tierra y arena del sitio (1:1:1); las plantas fueron regadas cada tercer día y abonadas con Triton (abono orgánico), 50 ml cada tercer día durante el primer mes, después se les aplicó 20 gr urea por maceta semanalmente. Una vez cubierto el 100% del bastidor del techo verde se llevó registro de la temperatura bajo la lámina de las dos habitaciones seleccionadas en cada casa, por medio de *dataloggers* marca MC modelo USB-500, colocado en la parte central de la habitación a una distancia de 15 cm de la lámina del techo (Fig. 8).



Figura 8. Data logger USB-500 colocado al centro de las habitaciones a una distancia de 15 cm con respecto de la lamina de zinc.

2.2.1. Evaluación del confort térmico.

Para evaluar el confort térmico se seleccionaron dos grupos de 10 personas. El primer grupo llamado “visitante” se conformó con jóvenes de 20-25 años, cuatro mujeres y seis hombres. La vestimenta de este grupo se estandarizó para la evaluación y consistió en pantalón de mezclilla azul claro, camiseta blanca de algodón, calcetas y zapatos de trabajo para ambos sexos. El segundo grupo llamado “residente” se conformó por los habitantes de las casas y vecinos, de 28-57 años de edad, seis mujeres y cuatro hombres, y la vestimenta únicamente se les indicó que fuera ligera, para el caso de los hombres fue pantalón de vestir, camisa, calcetines y zapatos y para las mujeres fue un vestido. Las evaluaciones se realizaron de 15:00 hrs a 18:00 hrs, los días 20 y 26 de septiembre de 2011 para los grupos visitante y residente, respectivamente. Cada persona participante visitó las 6 habitaciones del estudio y en cada una de ellas evaluó su grado de confort mediante un cuestionario elaborado *ex profeso*. Las rutas de visita fueron planeadas anticipadamente de manera que no hubiera más de dos personas por habitación al mismo tiempo,

y a cada persona participante se le asignó aleatoriamente una ruta distinta. Al entrar en cada habitación, las personas permanecieron sentadas durante 15 min, tras los cuales respondieron un cuestionario de 22 reactivos basado en diferenciales semánticos. El cuestionario se estructuró en tres secciones, las dos primeras (14 reactivos) fueron referentes al ambiente del cuarto y la sensación física del mismo, y la tercera (ocho reactivos) sobre la aceptación y percepción de los techos verdes.

Voto subjetivo. En las dos primeras secciones del cuestionario, cada reactivo fue calificado en una escala del cero al tres, donde el cero indicó una apreciación del ambiente como confortable y tres un ambiente no confortable. Se obtuvo el promedio calificación de estas dos secciones en conjunto, el cual es un índice del confort térmico como fue percibido por cada persona, y corresponde al voto subjetivo observado en cada habitación.

Voto medio predicho. Durante la estancia de cada persona se registró la temperatura de la habitación con un termómetro marca Steren modelo TER-100. Éste dispone de dos sensores, uno registró la temperatura del aire (bulbo seco) y otro registró la temperatura de globo, introduciendo el sensor en una esfera elipsoide oscura de plástico para calcular la temperatura radiante; la humedad y la velocidad del viento fueron registradas con una estación meteorológica inalámbrica marca Davis, modelo Vantage Pro26152 y un anemómetro marca Smart sensor, modelo AR816. De acuerdo con la edad y sexo de las personas, se calculó la tasa metabólica y con respecto al tipo de ropa se determinó el aislamiento de la vestimenta por medio de las tablas establecidas por la *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE)* (ANSI/ASHRAE STANDARD, 2004). Con los datos antes mencionados, se calculó el voto medio predicho (VMP) y el porcentaje de personas a disgusto (PPD), índices térmicos que nos

indican objetivamente el grado de confort de las personas. Para determinar el VMP se utilizó un algoritmo basado en la fórmula determinada por la ASHRAE (ASHRAE, 1992), y elaborado por la Universidad de Gävle, Suecia, que calcula el VMP y el PPD (Nillson y Håkan, 2005) como:

$$\begin{aligned} \mathbf{VMP} = & (0.303e^{-0.036M} + 0.028) [(M - W) - 3.05 \cdot 10^{-3} \{ 5733 - 6.99 (M - W) - p_a \} \\ & - 0.42 \{ (M - W) - 58.15 \} - 1.7 \cdot 10^{-5} M (5867 - p_a) - 0.0014M (34 - t_a) - 3.96 \\ & \cdot 10^{-8} f_{cl} \{ (t_{cl} - 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4 \} - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)] \quad (20) \end{aligned}$$

VMP = Voto medio predicho

M = Tasa metabólica, W/m² (1 metro = 58.15 W/m²)

W = Trabajo externo, m igual a cero para la mayoría de metabolismos

l_{cl} = Aislamiento térmico por vestimenta, pieza (1 pza = 0.155 m² K/W)

f_{cl} = Relación del área de la superficie del cuerpo vestida con respecto a la superficie del cuerpo desnudo

t_a = Temperatura del aire, °C

\bar{t}_r = Temperatura radiante media, °C

v_{ar} = Velocidad relativa del aire, m/s

p_a = Humedad relativa, %

h_c = Coeficiente de transferencia de calor por convección, W/m²K

t_{cl} = Temperatura superficial de la ropa, °C

Donde la temperatura radiante es:

$$t_r = \sqrt[4]{(t_g + 273)^4 + \frac{h_{cg}}{h_r} - (t_g - t_a) - 273} \quad (3.5)$$

t_r : Temperatura radiante (°C)

t_g : Temperatura de globo (°C)

h_{cg} : Coeficiente de transferencia de calor por convección para un globo elipsoide (W/m²/°C)

$$h_r = \varepsilon \cdot \sigma = 0.95 - 5.67 \cdot 10^{-8} = 5.38 \cdot 10^{-8}$$

h_r : Coeficiente de calor por radiación (W/m²/°C)

$$h_{cg} = \max_of \begin{matrix} 6.3 \frac{(v_a)^{0.6}}{D^{0.4}} \\ 1.4 \left(\frac{|t_g - t_a|}{D} \right)^{0.25} \end{matrix}$$

t_a : Temperatura del aire (°C)

V_a : Velocidad del aire en un punto (m/s)

D : Diámetro del sensor de temperatura de globo (m)

$$\mathbf{PPD} = 100 - 95 e^{-(0.03353 - PVM^4 + 0.2179 - PVP^2)}$$

Aceptación de los techos verdes. Con la tercera sección del cuestionario aplicado a los participantes se evaluó su aceptación de los techos verdes. Cada reactivo de esta sección fue evaluado del 0 al 8, donde cero correspondió a un rechazo y ocho a una completa aceptación. Se obtuvo un índice de aceptación por persona utilizando el promedio de sus respuestas en las tres casas, y se obtuvo el promedio general de aceptación de cada grupo evaluador.

Análisis estadístico. Dentro de cada grupo evaluador, se probó si existieron diferencias significativas entre tratamientos respecto al voto subjetivo mediante análisis de varianza para parcelas divididas en bloques al azar, donde la parcela mayor fue la casa, la parcela menor el tipo de techo, y el factor de bloqueo la persona. Este análisis se realizó utilizando el PROC MIXED de SAS (SAS, 2010).

Dentro de cada grupo evaluador se obtuvo el VMP y el PPD para cada tipo de techo por casa. Los promedios por tipo de techo fueron comparados mediante pruebas de t de una cola para muestras pareadas, a fin de determinar si el VMP y el PPD fueron menores en las habitaciones con techo verde que en aquellas sin techo verde. Estas pruebas se realizaron en Microsoft Excel 2010; en el caso del PPD, se utilizó la transformación arcoseno, recomendada para la comparación de porcentajes (Sokal y Rohlf, 1981). Además, se comparó la temperatura promedio bajo la lámina del techo de cada habitación, registrada durante la realización de las evaluaciones del confort térmico. Para ello se realizaron pruebas de t de una sola cola para muestras pareadas, a fin de determinar si la temperatura bajo las láminas con techo verde fueron menores que las que tuvieron techo verde; estas pruebas se realizaron en Microsoft Excel 2010.

2.3. Resultados

La temperatura promedio bajo la lámina de las habitaciones con techo verde fue significativamente menor que en las habitaciones sin techo verde (Figura 9). El voto subjetivo del grupo residente y del grupo visitante fue significativamente menor en las habitaciones con techo verde que en aquellas sin techo verde (Figuras 10 y 11), observándose también un efecto significativo de la casa y de la interacción casa x tipo de techo en el grupo residente (Figura 9).

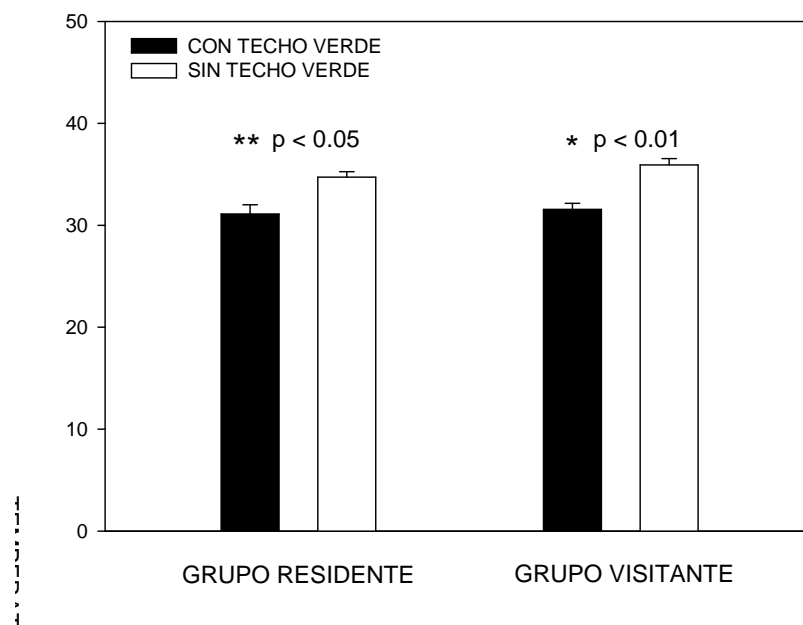


Figura 9. Temperatura promedio (+DE) bajo la lámina del techo de la habitación durante las evaluaciones de confort. Los asteriscos indican las probabilidades asociadas a pruebas de t de una cola para muestras pareadas, comparando las temperaturas promedio dentro de cada grupo evaluador.

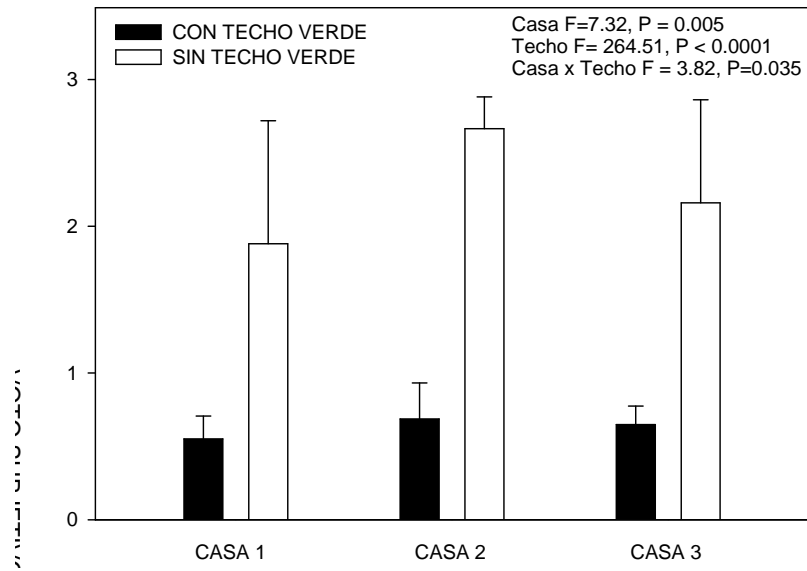


Figura 10. Promedio por casa del voto subjetivo del grupo visitantes (+DE). La escala del voto de cero a tres, donde los valores más altos indican menor confort. Se indican resultados del análisis de varianza.

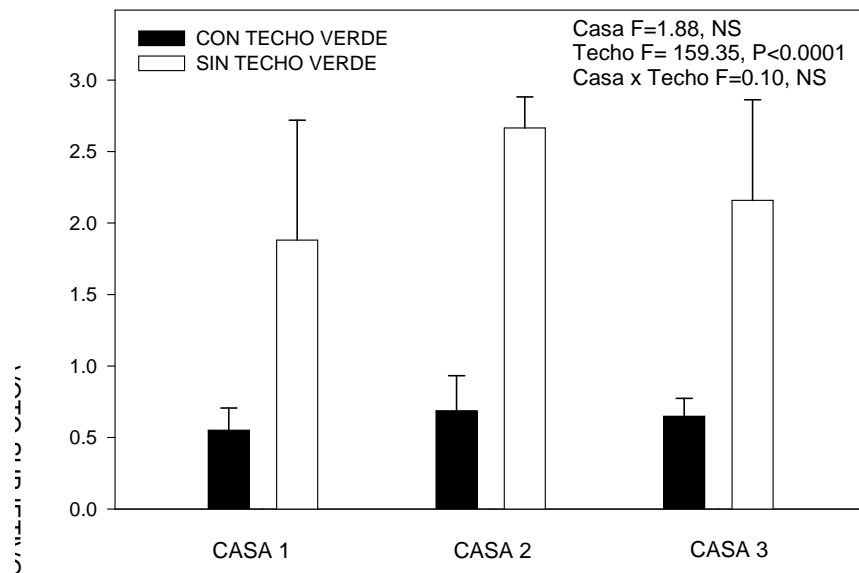


Figura 11. Promedio por casa del voto subjetivo del grupo residentes (+DE). La escala del voto de cero a tres, donde los valores más altos indican menor confort. Se indican resultados del análisis de varianza.

El VMP tanto del grupo residente como del grupo visitante fue significativamente menor en las habitaciones con techo verde que en aquellas sin techo verde (Figura 12). Asimismo, el porcentaje de personas a disgusto (PPD) fue significativamente mayor en las habitaciones sin techo verde que en aquellas con techo verde (Figura 13).

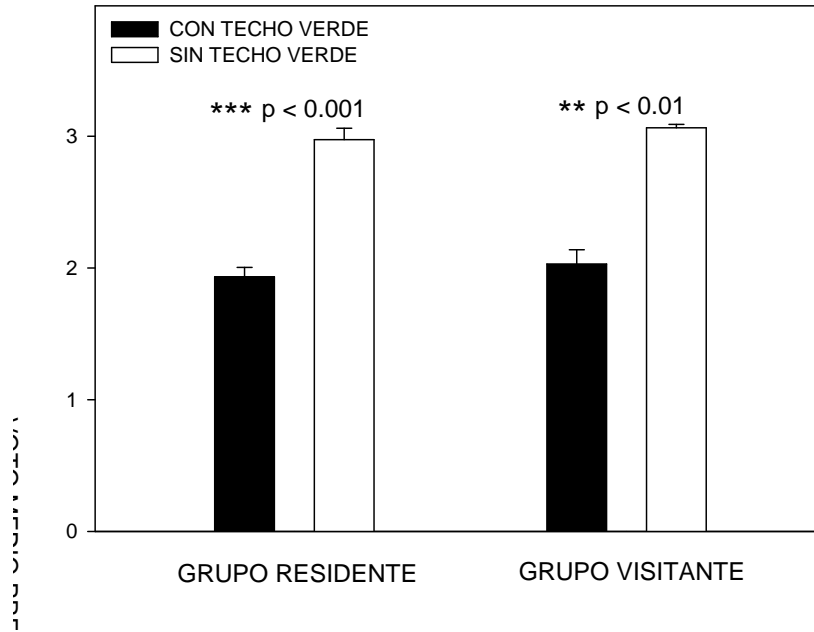


Figura 12. Voto medio predicho por tipo de techo (+DE). La escala del voto del cero al tres, donde los valores más altos indican menor confort. Los asteriscos indican las probabilidades asociadas a pruebas de t de una cola para muestras pareadas, comparando los VMP dentro de cada grupo evaluador.

En cuanto al índice de aceptación promedio de los techos verdes por el grupo residente fue de 4.9 (con una mínima de 4.2 y una máxima de 6.2), mientras que el del grupo visitante fue de 6.2 (con una mínima de 4.8 y una máxima de 7.5).

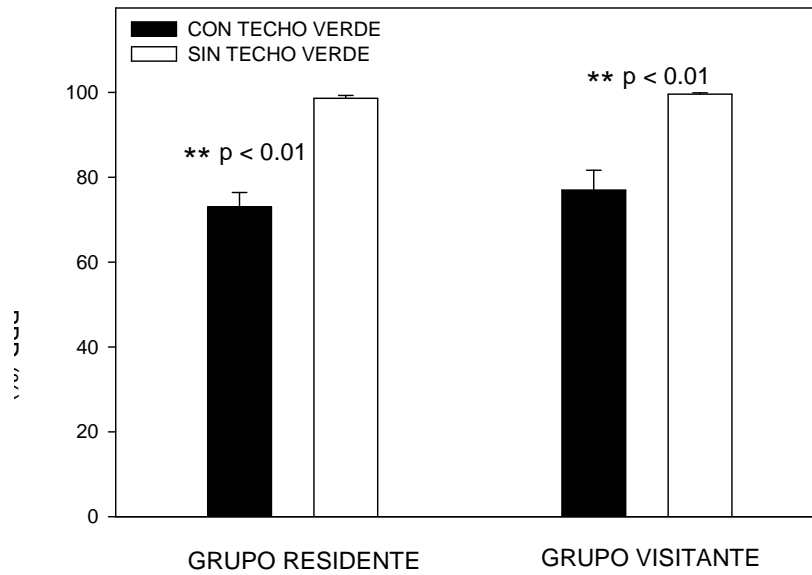


Figura 13. Porcentaje de personas a disgusto (+DE). Los asteriscos indican las probabilidades asociadas a pruebas de t de una cola para muestras pareadas, comparando los porcentajes promedio dentro de cada grupo evaluador.

2.4. Discusión

Concordando con Lui y Baskaran (2003) y De Nardo *et al.* (2005), existió una disminución significativa de temperatura en la lámina de las habitaciones cubiertas con el techo verde, si bien fue una reducción menor a la de los autores mencionados. Esta reducción de temperatura de la lámina del techo coincidió con una mayor percepción subjetiva de confort tanto del grupo visitante como del residente, así como en el voto medio predicho y un menor porcentaje de personas a disgusto. Aunque en el grupo visitante el voto subjetivo no presentó variación atribuible a la casa o a la interacción casa x techo, en el grupo residente estas fuentes de variación tuvieron un efecto significativo. Ello podría deberse a que el grupo residente fue más sensible a pequeños cambios ambientales por estar más familiarizados con sus casas.

De acuerdo con los objetivos perseguidos, el prototipo de techo verde implementando la especie *Cissus verticillata*, cumple la función brindar un mayor confort térmico en las casas de una zona tropical rural, a pesar de que únicamente el dosel de plantas es el que lleva la actividad de amortiguador térmico. Cabe resaltar que el éxito de la propagación de los techos verdes para tener un amortiguamiento térmico adecuado, se basa en tener la cantidad de sustrato necesario para el desarrollo de las plantas, una nutrición balanceada y una aportación mínima pero constante de agua. Un cambio en el prototipo aquí utilizado a explorar en futuras investigaciones sería el de sembrar las plantas directamente en el suelo, para un mayor desarrollo de la planta.

En cuanto a la aceptación del prototipo de techo verde en la localidad de Angostillo, este fue exitoso ya que las personas expresaron su agrado, debido probablemente a la familiaridad que existía con la especie florística que se usó y las características fisiológicas de la misma, ya que al no defoliar y no tener larva de algún insecto, hacían atractiva su implementación, no solo en los techos sino en otras áreas de uso común como sus patios o lugares de sombra para su ganado.

A pesar de que las personas propias del sitio percibían que el prototipo de techo verde era algo sencillo, lo catalogaban como una idea innovadora y con miras a replicarlo ya que después de la pruebas de confort térmico, mostraron su interés debido a que fue muy notorio el cambio de temperatura en las habitaciones y expresaron que para mayo (mes de mayor temperatura) los ayudaría mucho en el pronto enfriamiento de sus techos (lamina de zinc). Por último, también mencionaron una ventaja, no esperada, proporcionada por los techos verdes, la cual expresaron respecto al aislamiento del ruido generado por la lluvia sobre el techo de lámina, el cual es amortiguado por el techo verde.

Es de resaltar que en las viviendas de Angostillo ordinariamente no existe confort térmico y si bien el techo verde de techo verde mejoró el confort térmico significativamente desde el punto de vista estadístico, el grado de confort sigue siendo lejano del punto de confort óptimo, ya que la mejoría únicamente fue parcial provista por el prototipo de techo verde fue parcial. Se requieren más estudios que prueben otras técnicas o métodos además de los techos verdes que contribuyan a disminuir la temperatura de las casas hasta llegar al punto deseado.

2.5. Literatura citada

- ASHRAE. 1992. ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Atlanta, USA.
- ASHRAE. 2004. Thermal environmental conditions for human occupancy. ASHRAE Standard, ashrae.org. Pp.55.
- Currit N. y Easterling W.E. 2009. Globalization and population drivers of rural-urban land-use change in Chihuahua. *Mexico Land Use Policy* **26**(3): 535-544.
- De Nardo J.C., Jarrett A.R., Manbeck H.B., Beattie D.J. y Berghage R.D. 2003. Storm water detention and retention abilities of green roofs. *World Water and Environmental Resources Congress* 23-26.
- De Nardo J.C., Jarrett A.R., Manbeck H.B., Beattie D.J., y Berghage R. D. 2005. Storm water mitigation and surface temperature reduction by green roofs. *ASAE* **48**:1491-1496.
- Del Barrio E.P. 1998. Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. *Energy and Buildings* **27**: 179-193.
- Ekaterini E. y Dimitris A. 1998. The contribution of a planted roof to the thermal protection of buildings in Greece. *Energy and Buildings* **27**: (3) 29-36.
- Feriadi H. y Wong N.H. 2004. Thermal comfort for naturally ventilated houses in Indonesia. *Energy and Buildings* **36**: 614-626.
- García E. 1973. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Universidad Nacional Autónoma de México. México. D.F. México.

- ISO 7730. 1995. Moderate Thermal Environments—Determination of the PMV and PPD Indices and Specifications for Thermal Comfort, 2nd ed., International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1995.
- Kvisgaard B. 1997. *Thermal Comfort*. INNOVA Air Tech Instruments A/S. Denmark. Pp.31
- Korsareo L. y Ries R. 2007. Comparative environmental life cycle assessment of green roofs. *Building and Environment* **42**: 2606–2613.
- López C.C.J. 2008. Uso actual, potencial y clasificación campesina de tierras agrícolas en la comunidad de Angostillo, municipio de Paso de Ovejas, Veracruz, México. Reporte Técnico. Colegio de Postgraduados Campus Veracruz. Veracruz. México. 42 p.
- Lui K. y Baskaran B. 2003. Thermal performance of green roofs through field evaluation—Ottawa, National Research Council Canada, Institute for Research in Construction, Ottawa (Canada) Report no. NRCC-46412.
- Mas J.F., Velázquez A., Reyes R., Díaz-Gallegos R., Mayorga-Saucedo A., Alcántara C., Bocco G., Castro R., Fernández T., Pérez-Vega A. 2004. Assessing land use cover changes: a nationwide multirate spatial database for Mexico. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **5** (4): 249–261.
- Niachou A., Papakonstantinou K., Santamoris M., Tsangrassoulis A. y Mihaakakou G. 2001. Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. *Energy and Buildings* **33**(7): 719-729.
- Nilsson L. y Håkan O. 2005. *Comfort Climate Evaluation with Thermal Manikin Methods and Computer Simulation Models*. University of Gävle, Sweden. Pp 202.
- Oberndorfer E., Lundholm J., Bass B., Coffman R.R., Hoshi H. y Dunnett N. 2007. Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions, and services. *BioScience* **57**: 10-14.
- Peck S.W., Callaghan C., Kuhn M.E. y Bass B. 1999. Greenbacks from Green Roofs: Forging a New Industry in Canada. Canadian Mortgage and Housing Corporation Research Report. Pp. 68
- ROOFSOL. S.F. Commission of the European Communities, DG XLL Science, Research and Development: Roof solutions for natural cooling. Contract No. JOR3CT960074.
- Saiz S., Kennedy C., Bass B. y Pressnail K. 2006. Comparative life cycle assessment of standard and green roofs. *Environmental Science and Technology* **40**(13): 4312–4316.
- SAS. 2010. Statistical Analysis System, Enterprise Guide v 4.3.0. SAS Institute, Inc., Cary, North Carolina.USA.
- Simmons M., Bardiner B., Windhager S. y Tinsley J. 2008. Green roofs are not created equal: the hydrologic and thermal performance of six different extensive green roofs and

- reflective and non-reflective roofs in a sub-tropical climate. *Urban Ecosystems* **11**: 339-348.
- Sokal R. R. y Rohlf F.J. 1981. Biometry. Second Edition. Freeman and Company. New York, USA. p. 427.
- Tabares-Velasco P.C. y Srebric L. 2009. The role of plants in the reduction of heat flux through green roofs: laboratory experiments. *ASHRAE Transactions* 115(2): 793-802.
- Takebayashi H. y Moriyama M. 2007. Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island. *Building and Environment* **42**: 2971–2979.
- Teemusk A. y Mander U. 2010. Temperature regime of planted roofs compared with conventional roofing systems. *Ecological Engineering* **36** (1):91-95.
- Thompson W.M. 1998. Grass-Roofs Movement. *Landscape Architecture* **88**: 47-51.
- Van Renterghem T y Botteldooren D. 2008. Numerical evaluation of sound propagating over green roofs. *Journal of Sound and Vibration* **317**: 781-799.
- Van Woert N.D., Rowe D.B., Andresen J.A., Rugh C.L., Fernandez R.T. y Xiao L. 2005. Green roof storm water retention: effects of roof surface, slope, and media depth. *Journal of Environmental Quality* **34**:1036–1044.
- Wanphen S. y Nagano K. 2009. Experimental study of the performance of porous materials to moderate the roof surface temperature by its evaporative cooling effect. *Building and Environment* **44** (2): 338–351
- Wong N.H, Tay S.F., Wong R., Ong C.L. y Sia A. 2003a. Life cycle cost analysis of rooftop gardens in Singapore. *Building and Environment* **38** (3): 499–509.
- Wong N.H., Chen Y., Ong C.L. y Sia A. 2003b. Investigation of thermal benefits of rooftop gardens in the tropical environment. *Building and Environment* **38**: 261–270.
- Yang J., Yu Q. y Gong P. 2008. Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmospheric Environment* **42**:7266–7273.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

1. Conclusiones

En el presente trabajo se diseñó un prototipo de techo verde tomando en cuenta las condiciones biofísicas, económicas y culturales de Angostillo, Veracruz. El prototipo utiliza, a diferencia de los techos verdes convencionales, una especie enredadera nativa y su estructura, al no implicar el depósito de sustratos en el techo de la vivienda, es ligera.

1.- De acuerdo con el primer objetivo se elaboró un listado de 24 especies de enredaderas tropicales, que son cultivadas o crecen silvestres en la región, las cuales fueron calificadas respecto a su potencial de uso en techos verdes en zonas rurales tropicales. Las cinco especies con las calificaciones más altas fueron las cultivadas *Mandevilla sanderi* (mandevilla), *Solandra maxima* (copa de oro), *Passiflora edulis* (maracuyá), *Thunbergia alata* (tumbergia) y la silvestre, *Cissus verticillata* (tripa de vaca o manta de cielo).

2.- En cumplimiento del segundo objetivo y de acuerdo con la evaluación en campo sobre techos modelo, de las cinco especies calificadas con el más alto potencial de uso, se seleccionó a *Cissus verticillata* como la especie de mejor desempeño y adaptación al ambiente del prototipo de techo verde, por su respuesta en crecimiento, facilidad de manejo y adaptabilidad.

3.- De la evaluación del confort térmico brindado por el prototipo de techo verde diseñado con *C. verticillata*, el techo verde mejoró el confort de las habitaciones y disminuyó la temperatura de la lámina de zinc de las viviendas rurales evaluadas.

2. Recomendaciones

- Completar estudios de fenología y de manejo del cultivo de *Cissus verticillata*.
- Probar la plantación de las enredaderas directamente en el suelo para un mejor desarrollo de las raíces.
- Realizar estudios para la mejora de la estructura de soporte del techo verde, probando diferentes materiales con menor peso y menor inversión.
- Llevar a cabo una capacitación y un trabajo en conjunto con los propietarios de las casas a las que les fue implementado el techo verde, para que el proyecto tenga continuidad.
- Probar el desempeño de otras especies silvestres nativas a fin de incrementar las opciones de diseño y diversidad de los techos verdes.

A2. Memoria fotográfica.



**Tripa de vaca ó cortina del
cielo**

***Cissus verticillata* (L.) Nicolson**

& C. E. Jarvis

Familia: Vitaceae



Flor de San Diego

***Antigonon leptopus* Hook. &**

Arn.

Familia: Polygonaceae



Enredadera de nueve hojas

***Serjania goniocarpa* Randlk**

Familia: Sapindaceae



Peine de chango

Pithecoctenium crucigerum

(L.) A.H. Gentry

Familia: Bignoniaceae



Mandevila

Mandevilla Sanderi (M. iaxa)

Familia: Apocynaceae



Copa de oro

Solanandra máxima (Sessé &
Moc.) P. S. Green

Familia: Solanaceae



Tumbergia

Thunbergia alata Bojer ex
Sims

Familia: Acanthaceae



Maracuyá

Passiflora edulis Sims.

Familia: Passifloraceae



Bastidor de PTR, estructura de evaluación de especies.



Techo verde en una de las casas de Angostillo, Ver.

A3. Instrumento para la evaluación del Voto Subjetivo.

Fecha: _____ Hora: _____

Nombre: _____ Sexo: _____ Edad: _____

**COLOCA TU RESPUESTA CON UNA CRUZ EN ALGUN PUNTO DE LA LINEA
RESPECTO A LA TEMPERATURA DEL CUARTO EL AMBIENTE SE SIENTE:**

| | | |
|---------------|-------|--------------|
| FRESCO | _____ | CALUROSO |
| AGRADABLE | _____ | DESAGRADABLE |
| LIGERO | _____ | PESADO |
| CÓMODO | _____ | INCOMODO |
| FRIO | _____ | CALIENTE |
| A GUSTO | _____ | A DISGUSTO |
| NO FASTIDIDAD | _____ | FASTIDIOSO |

RESPECTO A LA TEMPERATURA DEL CUARTO YO ME SIENTO:

| | | |
|---------------|-------|--------------|
| FRESCO | _____ | CALUROSO |
| AGRADABLE | _____ | DESAGRADABLE |
| LIGERO | _____ | PESADO |
| CÓMODO | _____ | INCOMODO |
| FRIO | _____ | CALIENTE |
| A GUSTO | _____ | A DISGUSTO |
| NO FASTIDIDAD | _____ | FASTIDIOSO |

RESPECTO A LA CONSTRUCCIÓN DEL TECHO VERDE ME PARECE:

| | | |
|------------|-------|-------------|
| ÚTIL | _____ | INÚTIL |
| BONITO | _____ | FEO |
| BUENO | _____ | MALO |
| EFICAZ | _____ | INEFICAZ |
| BUENA IDEA | _____ | MALA IDEA |
| VALIOSO | _____ | SIN VALOR |
| POSITIVO | _____ | NEGATIVO |
| EFICIENT | _____ | INEFICIENTE |