

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD

DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS Y TECNOLÓGICAS

**MODELO PRELIMINAR DE TECHO VERDE EN UNA ZONA ÁRIDA:
ASPECTOS FISIOLÓGICOS Y MICROCLIMÁTICOS**



PABLO BENAVIDES SECHSLINGLOFF

Hermosillo, Sonora

Septiembre 2016

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

FORMATO DE APROBACIÓN

Los miembros del Comité de Tesis designado para revisar la Tesis de Pablo Benavides Sechslingloff la han encontrado satisfactoria y recomiendan que sea aceptada como requisito para obtener el Título de Licenciado en Biología con Opción en Recursos Naturales Terrestres.

Dra. Clara Leonor Tinoco Ojanguren

Director de Tesis

Dr. Alejandro Emilio Castellanos Villegas

Sinodal Secretario

Dr. Diego Valdez Zamudio

Sinodal

Dra. María Cristina Peñalba Garmendia

Suplente

DEDICATORIA

A mis padres y hermanas

Por siempre apoyarme en absolutamente todo, por alentarme a ser un hombre de educado en lo académico y en lo humano, además, por mostrarme el camino hacia la buena vida, una librepensadora y responsable.

A la Dra. Clara Tinoco Ojanguren

Por haberme dado la oportunidad y por ayudarme a desarrollar uno de los trabajos más grandes y significativos que he hecho en mi vida. Para mi es una científica y persona admirable.

Soñar no te servirá de nada, si olvidas vivir

Albus Dumbledore

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Sonora y al Departamentos de Investigaciones Científicas y Tecnológicas por darme las bases y herramientas para la realización de este y futuros trabajos.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y al Laboratorio de Ecología Molecular y Funcional del Instituto de Ecología, por permitirme desarrollar este trabajo en sus instalaciones.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica PAPIIT proyecto IN212914, por el apoyo en la compra del equipo utilizado en el presente trabajo.

A la Doctora Clara Tinoco Ojanguren, por su inmensa ayuda y asesoramiento. Siempre estaré agradecido por todo su apoyo, que fue más que académico. Le agradezco también por su paciencia, por hacer de la fisiología vegetal algo más bonito de lo que ya es, además, agradezco la oportunidad de dejarme ser su alumno.

A José F. Martínez Rodríguez del Instituto de Ecología de la UNAM, por su ayuda en el trabajo de campo, compra de materiales y otros aspectos técnicos y logísticos del presente trabajo. Por igual, a Anabel M. Díaz Martínez, por su ayuda en el trabajo de laboratorio.

A Jorge Escutia de la UNAM por su valioso asesoramiento en teoría y práctica sobre techos verdes.

A la Doctora Rosa M. Montesinos Cisneros de la Universidad de Sonora, por sus enseñanzas y ayuda en estadística.

Al Doctor Francisco E. Molina Frenaner, por sus correcciones y recomendaciones en los ensayos de los seminarios.

Al comité de mi tesis (Dra. Cristina Peñalba, Dr. Alejandro Castellanos y Dr. Diego Valdez) y al resto de mis maestros de la carrera que fueron una inspiración para adentrarme y seguir explorando el mundo demandante, riguroso y placentero de la biología.

A mi familia, por su apoyo incondicional, por siempre respetar mis ideas, por su amor y por siempre tenerme en su consideración. Incluyo aquí al Loky, Torta, Ronda, Cooper, Agustín y Alfa, que también son parte importante de mi familia y mi vida.

A mis amigos Pedro, Marycruz, Alicia, Yeimi, Lupita, Andrés (El Raso), Danitza, Cindy, Carlos (El Charlie), Gerardo, Sandra, Emilio, Bernardo, Leonardo, Paty, Caro, Elyana, Mirna, Víctor, a todos los Huracanes, Marco Polo, Ximena (Mi gordis), Rocío, Dulce, Gustavo, Enrique (El Reta), Miriam, Mati, Elisa, Roberto, Juan, Grecia, Ale (wee), Caro (wee), Alexis (wee), Andrés, Luis, Raisa, por amenizar mi vida, a veces no puedo creer lo bien que se siente conocerlos. A Viviana, por enseñarme a tener paciencia, serenidad y cariño cuando estas cualidades parecen ausentes. A Laura, por las vivencias desde la preparatoria y sus ánimos por seguir viviendo lejos de las repercusiones negativas. A Karen y Karla, por la ayuda, la comida y la diversión dentro y fuera del laboratorio. A Eduardo (El Güero) por sus sabias enseñanzas. A Julio, por su amistad originalmente sarcástica y su enorme ayuda en la fase experimental de esta tesis. A Stpeh, por demostrar que lo más importante en nuestro tiempo es la libertad de decidir, sobre cualquier cosa, en base a la felicidad de uno mismo. Al resto de las personas que he conocido y que han sido una inspiración. Si pudiera, repetiría el tiempo una infinidad de veces.

CONTENIDO

FORMATO DE APROBACIÓN	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
CONTENIDO	v
LISTA DE TABLAS	viii
LISTA DE FIGURAS	xi
RESUMEN	1
I. INTRODUCCIÓN	2
II. ANTECEDENTES	5
II. 1. Panorama Global de los Techos Verdes	6
II. 2. Beneficios de los Techos Verdes	7
III. 2. 1. Techos verdes como microclimas dentro de las ciudades	8
II. 3. Clasificación de los Techos Verdes	9
II. 4. Consideraciones Técnicas para la Instalación de Techos Verdes	11
II. 5. Plantas para un Techo Verde	13
II. 6. Instalación y Mantenimiento de Plantas para un Techo Verde	17
II. 6. 1. Propagación vegetativa de plantas	18
II. 6. 2. Germinación de semillas	20
II. 6. 3. Mantenimiento de plantas	21
II. 7. Techos Verdes en Zonas de Clima Cálido y Seco	22
II. 7. 1. Efecto térmico de techos verdes en zonas de clima cálido y seco	23
II. 8. Fisiología de Plantas Enfocada a Techos Verdes	26
II. 9. Fluorescencia de la Clorofila	27
III. 9. 1. Estrés fisiológico determinado por medio de Fv/Fm	30
II. 10. Contenido de Clorofila	32
II. 11. Características Florísticas y Climáticas de Hermosillo, Sonora	33
III.11.1. Generalidades sobre la vegetación de las Planicies de Sonora del Desierto Sonorense	35

III. JUSTIFICACIÓN	38
IV. HIPÓTESIS CIENTÍFICA	39
V. OBJETIVOS	40
V. 1. Objetivo General	40
V. 2. Objetivos Específicos	40
VI. METODOLOGÍA	41
VI. 1. Selección de Plantas	41
VI. 2. Propagación y Obtención de Individuos	43
VI. 3. Conformación de Sustratos	46
VI. 4. Variación de Humedad en Mezclas de Sustrato	47
VI. 5. Evaluación de Plantas en Diferentes Sustratos: Experimento en Macetas	48
VI. 6. Modelo Experimental de Techo Verde	49
VI. 6. 1. Mediciones de temperatura dentro de los modelos experimentales	50
VI. 6. 2. Temperatura sobre la cubierta ajardinada	51
VI. 6. 3. Datos fisiológicos y abióticos	52
VI. 6. 4. Características físicas de las plantas	53
VII. RESULTADOS	55
VII. 1. Propagación de las Especies	55
VII. 1. 1. Germinación de <i>Carissa macrocarpa</i>	55
VII. 1. 2. Germinación de <i>Encelia farinosa</i>	55
VII. 1. 2. 1. Experimento de enterramiento de semillas	58
VII. 1. 3. Propagación de <i>Portulacaria afra</i>	59
VII. 1. 4. Propagación de <i>Agave desmettiana</i>	60
VII. 2. Caracterización de Sustratos y sus Componentes	60
VII. 3. Diferencia de Humedad Volumétrica entre Sustratos	62
VII. 4. Experimento de Plantas en Macetas	65
VII. 4. 1. Relación entre humedad del sustrato y variables fisiológicas	66
VII. 4. 2. Comportamiento del agua en los sustratos	67
VII. 5. Modelo Experimental de Techo Verde: Fisiología y Microclima	71
VII. 5. 1. Relación de parámetros fisiológicos con variables abióticas	71

VII. 5. 2. Comparación de Fv/Fm entre especies	74
VII. 5. 3. Comportamiento del Índice de Contenido de Clorofila	78
VII. 5. 4. Temperatura dentro de los modelos experimentales	80
VII. 5. 5. Temperatura en la zona ajardinada de los modelos experimentales	83
VII. 5. 6. Comparación de temperaturas entre los modelos experimentales y un techo convencional	85
VII. 5. 7. Relación entre la humedad del sustrato y temperatura sobre la cubierta ajardinada	87
VII. 5. 8. Contenido de agua en los sustratos	88
VII. 5. 9. Crecimiento de las plantas	89
VIII. DISCUSIÓN	91
VIII. 1. Variación de Características Físicas de los Sustratos y su Relación con su Contenido y Dinámica de Humedad	91
VIII. 1. 1. Pérdida de humedad entre sustratos	93
VIII. 2. Estrés de las Plantas en Condiciones de Techo Verde	96
VIII. 3. Variación del Contenido de Clorofila	103
VIII. 4. Relaciones de Temperaturas en los Modelos Experimentales	105
VIII. 4. 1. Temperatura sobre la cubierta ajardinada	108
VIII. 4. 2. Diferencias entre M1 y M2	111
VIII. 5. Consideraciones Sobre la Viabilidad y Manejo de las Especies Probadas y del Agua para Riego	112
IX. CONCLUSIONES	114
X. LITERATURA CITADA	116
XI. APÉNDICE	125
XI. 1. Fichas Descriptivas de las Especies	125

LISTA DE TABLAS

Tabla I	Valores de carga adicional al techo del inmueble por tipo de techo verde en estado saturado (Gaceta Oficial del Distrito Federal, 2008).	11
Tabla II	Comparación entre algunas variables bióticas y abióticas que se esperaría se presenten en los techos verdes de climas templados y árido - cálidos (modificado de Simmons, 2015).	15
Tabla III	Resumen de resultados del trabajo de Lerum y Thakare (2005).	25
Tabla IV	Especies probadas en los modelos experimentales de techo verde; también se incluye información sobre la familia taxonómica a la que pertenecen, forma de crecimiento y su origen geográfico.	42
Tabla V	Especies de plantas y criterios que justifican su uso en techos verdes.	43
Tabla VI	Mezclas desarrolladas y la proporción de sus componentes.	47
Tabla VII	Tratamientos aplicados a semillas de <i>E. farinosa</i> recién producidas y colectadas. Entre paréntesis se indican los días que tardó en iniciar la germinación.	57
Tabla VIII	Fecha de inicio de prueba de germinación de las bolsas enterradas en el CEES, número de semillas en cada una después de recuperadas y germinados totales por bolsa.	59
Tabla IX	Características físicas de los componentes utilizados en las mezclas para sustratos (n=10, excepto porosidad).	61

Tabla X	Características físicas de las mezclas (n=10, excepto porosidad). Superíndices diferentes indican diferencias significativas entre sustratos ($p<0.05$), iguales lo contrario.	61
Tabla XI	Coeficientes de correlación de Spearman (r_s) entre las variables dependientes Fv/Fm e ICC y la independiente % de θ_v (convertida a arcoseno para el análisis), para cada especie en ambos sustratos. “*” indica significancia ($p<0.05$).	66
Tabla XII	Ecuaciones de las rectas de mejor ajuste, correspondientes a la correlación lineal entre el tiempo y el arcoseno del % de θ_v , para cada especie en ambos sustratos. Se definen los intervalos del 95% de confianza (IC) para cada pendiente y, comparando sustratos por especie, se especifica si se solapan.	68
Tabla XIII	Resultados de los análisis de correlación entre las variables abióticas independientes: radiación fotosintéticamente activa (RFA), temperatura ambiente (TA), porcentaje volumétrico de agua (% de θ_v) y el cociente de fluorescencia variable y fluorescencia máxima (Fv/Fm) (variable dependiente) para cada especie creciendo en el sustrato 1 (S1) y 2 (S2); “*” indica $p<0.05$. Resultados sin r^2 ni F indican que solo corresponde r_s .	72
Tabla XIV	Resultados de los análisis de correlación lineal simple entre el índice de contenido de clorofila (ICC) y cada variable abiótica (ver abreviaciones de tabla XIII) para cada especie creciendo en el sustrato 1 (S1) y 2 (S2). Se usa la misma correspondencia de coeficientes indicada en la tabla XIV. “*” indica $p<0.05$.	73

Tabla XV	Valores promedio \pm desviación estándar de Fv/Fm por la mañana y al mediodía, por especie y modelo. Se muestran también los respectivos coeficientes de variación (C. V.). Cada promedio se calculó a partir de todos los datos capturados durante el experimento en su respectiva hora de muestreo.	78
Tabla XVI	Índice de contenido de clorofila (ICC) en la mañana y al mediodía para cada especie en los modelos (M1 y M2). Se muestran los promedios \pm desviación estándar por especie junto con los coeficientes de variación (C. V.). Cada promedio se calculó a partir de todos los datos capturados durante el experimento a su respectiva hora de muestreo.	79
Tabla XVII	Promedios por hora de medición de temperatura sobre modelos experimentales (M1 y M2) y el techo convencional. También se incluyen las temperaturas a ~ 10 cm sobre el sustrato registradas a esos tiempos. Superíndices diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$), iguales lo contrario.	86
Tabla XVIII	Ecuaciones de regresión múltiple, coeficientes de determinación múltiple con valores F y valores t para cada regresor; subíndices de x y t se refieren a los regresores: “1” al arcoseno de % de θ_v , “2” a la temperatura ambiente; “*” indica $p < 0.05$.	87
Tabla XIX	Altura y área de copa (AC) de las especies en sus respectivos modelos experimentales (M1 y M2). Se presentan los resultados iniciales y finales; “ Δ ” es el valor final menos el inicial.	90

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 Estructura general de un techo verde (tomado de Gaceta Oficial del Distrito Federal, 2008). 6
- Figura 2 Ubicación de la ciudad de Hermosillo, Sonora en un mapa que destaca las comunidades bióticas alrededor del Desierto Sonorense (Tomado de Dimmit, 2000). 35
- Figura 3 Dispersión de todos los valores del arcoseno del porcentaje de humedad volumétrica (% de θ_v). Cada punto representa el valor convertido de una sola repetición. Se incluyen las rectas de mejor ajuste: la superior correspondiente a S1 y la inferior a S2, además de sus respectivos intervalos del 95% de confianza. 63
- Figura 4 Porcentaje volumétrico de agua (% de θ_v) en relación con el tiempo transcurrido después de riego a saturación. El primer valor al tiempo 0 corresponde a saturación de agua. Cada punto representa el promedio \pm desviación estándar de 3 repeticiones. Los pares de puntos con letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$), con la misma letra lo contrario. 64
- Figura 5 Cambios en la humedad (% de θ_v) de S1 y S2 durante 10 días a la intemperie. El eje X representa el número de medición en el tiempo; cada medición corresponde a una toma de datos cada cinco minutos en una sola maceta por sustrato. 65
- Figura 6 Gráficas de valores máximos y mínimos del % de θ_v en ambos sustratos por especie. Cada barra corresponde a un promedio de tres repeticiones. Las barras de error corresponden a \pm una desviación estándar. 68

- Figura 7 Gráfica que muestra la dispersión de valores de humedad convertidos a arcoseno para S1 y S2 con la especie *Agave desmettiana*. Se incluyen las respectivas rectas de mejor ajuste para el conjunto de datos de cada sustrato (S1 y S2), también se muestran sus intervalos del 95% de confianza. Cada punto representa el valor convertido de una sola repetición. 69
- Figura 8 Cociente de fluorescencia variable y fluorescencia máxima (Fv/Fm) durante los 18 días de muestreo en el modelo experimental 1. Se muestran los valores para las cuatro especies estudiadas. Cada punto representa un promedio (n=5) de mediciones por la mañana (a) y al mediodía (b) en un día de muestreo. 76
- Figura 9 Cociente de fluorescencia variable y fluorescencia máxima (Fv/Fm) durante los 18 días de muestreo en el modelo experimental 2. Se muestran los valores para las cuatro especies estudiadas. Cada punto representa un promedio (n=5) de mediciones por la mañana (a) y al mediodía (b) en un día de muestreo. 76
- Figura 10 Promedios \pm desviación estándar de Fv/Fm por especie en todo el periodo experimental en ambos modelos experimentales (M1 y M2). Los puntos negros representan la media de mediciones por la mañana y los grises la de mediodía. 77
- Figura 11 Índice de contenido de clorofila (ICC) por especie en todo el periodo experimental en ambos modelos (M1 y M2). Los puntos negros representan la media \pm desviación estándar de mediciones por la mañana y los grises la de mediodía. 79

Figura 12	Variación diaria de los promedios por hora de registro de la temperatura ambiente (TA), la temperatura interna de los modelos experimentales (M1 y M2) y la temperatura dentro del control (C), durante el periodo experimental.	81
Figura 13	Curso de temperaturas correspondientes a un día totalmente soleado (14 de agosto 2015). Se muestra la temperatura de los modelos (M1 y M2), el control (C) y ambiente (TA).	81
Figura 14	Curso de temperaturas correspondientes a un día semi nublado (9 de septiembre 2015). Se muestra la temperatura de los modelos (M1 y M2), el control (C) y ambiente (TA).	82
Figura 15	Diferencias de los promedios horarios entre los modelos experimentales (M1 y M2) y el control. Las diferencias negativas indican que los modelos se mantuvieron a menor temperatura que el control y las positivas lo contrario.	82
Figura 16	Diferencias de los promedios horarios entre los modelos experimentales (M1 y M2) y la temperatura ambiente (TA). Las diferencias negativas indican que los modelos llegaron a menor temperatura que TA y las positivas lo contrario.	83
Figura 17	Curvas diurnas de promedios horarios de las temperaturas ambiente (TA) y a ~10 cm sobre el sustrato de módulos de los modelos experimentales (M1 y M2).	84

- Figura 18 Diferencias de promedios horarios entre la temperatura ambiente y la temperatura a ~10 cm sobre la capa de sustrato entre plantas, en ambos modelos experimentales (M1 y M2). Las diferencias positivas indican que la temperatura de los modelos fue mayor que TA y las negativas lo contrario. 85
- Figura 19 Cambios de humedad en el sustrato de cada modelo experimental (M1 y M2) durante el experimento. Cada punto representa un promedio de n=5. “*” indican diferencia significativa ($p<0.05$) entre ese par de puntos. Flechas indican eventos de lluvia próximos o en ese tiempo de medición. 89

RESUMEN

Los techos verdes son cubiertas con vegetación que se implementan en muchas ciudades del mundo, principalmente de clima templado, con el objetivo de obtener ciertos beneficios, entre los cuales está la regulación de temperatura dentro del inmueble y del aire externo. La implementación de esta tecnología en ciudades de clima cálido y seco es emergente y los efectos térmicos y desempeño de especies de plantas son uno de los campos de estudio que puede ayudar a determinar su viabilidad en climas extremos. En la presente tesis, se construyeron dos modelos experimentales de techo verde, en los cuales se determinó el desempeño fisiológico de cuatro especies de plantas, midiendo un parámetro de fluorescencia de la clorofila (F_v/F_m) y el contenido de clorofila en hojas. Las especies fueron: *Agave desmettiana*, *Portulacaria afra*, *Carissa macrocarpa* y *Encelia farinosa*. Las plantas se probaron en dos sustratos con diferente capacidad de retención de agua. También se estudiaron los efectos térmicos de las cubiertas ajardinadas, midiendo la temperatura bajo y sobre ellas, esto durante un periodo de 40 días. Se esperó que los modelos fueran funcionales bajo las condiciones climáticas de un verano en Hermosillo, Sonora (temperatura máxima de 39° C). Se detectó un efecto térmico refrescante dentro de los modelos de techo verde durante las horas más calientes del día; mientras que *A. desmettiana* y *P. afra* (ambas suculentas) se consideraron las mejores para las condiciones experimentales, *C. macrocarpa* y *E. farinosa* también se consideran aptas, pero requerirían mayores precauciones y cuidados para su uso en techos verdes. Se concluye que los techos verdes podrían ser una opción viable como sistemas de naturación en Hermosillo, aunque se advierte que aún falta mucha información empírica sobre la funcionalidad de esta tecnología en una ciudad de clima tan extremo.

I. INTRODUCCIÓN

La expansión territorial de las zonas urbanas es un fenómeno actual que llega a generar problemas socioeconómicos y ambientales. El crecimiento acelerado de la población mundial y su concentración en zonas urbanas son algunos de los factores principales que desencadenan la expansión del perímetro urbano. La existencia de grandes urbes se considera perjudicial para el ambiente, debido al cambio de uso de suelo, ya que generalmente se sustituyen tierras fértiles de cultivo y ecosistemas naturales con gran biodiversidad; además se crean islas de calor debido a la sustitución de la vegetación natural por construcciones de concreto y asfalto. Otros problemas relacionados a las grandes urbes son la contaminación (atmosférica, del agua y del suelo), generación de residuos y degradación de recursos naturales (UNPF, 2007).

Una de las soluciones a algunos de estos problemas ambientales son los sistemas de naturación, que actualmente se implementan en muchas partes del mundo y los cuales son objeto de investigación científica por los beneficios que se les atribuyen. Los sistemas de naturación urbana tienen el objetivo de crear un ambiente natural dentro de las ciudades; esto se logra mediante la convergencia entre infraestructura urbana y la implementación de vegetación sobre ella con tal de recuperar áreas verdes perdidas por efecto de la urbanización (Gaceta Oficial del Distrito Federal, 2008; de Felipe y Briz, 2010; Pauleit et al., 2012; Urbano-López, 2013). La palabra naturación se refiere a la incorporación de la naturaleza en la vida cotidiana, y esto se logra mediante técnicas de construcción que involucren la instalación de un medio capaz de sostener vegetación adaptada a las condiciones climáticas de determinada ciudad, ya sea en techos o en fachadas de edificios y casas (de Felipe y Briz, 2010).

Los techos verdes son cubiertas ajardinadas que forman parte de los sistemas de naturación urbana. Se afirma que un techo verde se logra cuando un esquema de plantación de vegetación es implementado sobre un techo (Green Roof Organization, 2014). Generalmente consisten en un sistema de varias capas de diferentes materiales; estas protegen la estructura donde se instalan (el techo del inmueble) sobrepuestas bajo una capa de sustrato que permite el crecimiento de especies vegetales, ya sea herbáceas y/o leñosas, adaptadas a condiciones ambientales específicas (Lawlor et al., 2006; Köhler, 2006; Stephenson, 2008). También existen

los de tipo modular, que consisten en contenedores de plástico acomodados en mosaico y adaptados para el crecimiento de plantas y protección al techo del inmueble.

La selección de especies vegetales es una de las áreas de conocimiento más importantes para asegurar el éxito de los techos verdes (Dvorak y Volder, 2010). El conocimiento de las especies a implementar es un punto clave, ya que las condiciones de vida que experimentarían las plantas sobre un techo son adversas e incluyen: temperaturas extremas, exposición constante a la radiación solar, periodos de sequía (según el tipo de techo) y fuertes vientos. Estas condiciones extremas pueden generar estrés en las plantas de una cubierta ajardinada. Por lo anterior deben seleccionarse, para este fin, plantas con atributos funcionales que les permitan sobrevivir bajo tales condiciones, ya sea evitándolas o tolerándolas. Es recomendado el uso de especies nativas al bioma en el que se ubica la ciudad donde inciden los techos verdes, sobre todo si son de ornato y producidas en vivero, aunque también se promueve el uso de especies ornamentales de vivero no necesariamente nativas, pero sí resistentes y que no representen un peligro de invasión en los hábitats de los alrededores; también se recomienda usar plantas suculentas, de crecimiento rápido y de cobertura amplia (Oberndorfer et al., 2007; Dvorak et al., 2010).

La implementación de los techos verdes ha cobrado mucha popularidad en las últimas décadas debido a los beneficios que proporcionan. Su tecnología ha sido bien desarrollada e implementada en Europa, Norteamérica y en algunas ciudades asiáticas (Stephenson, 2008; Vijayaraghavan y Raja, 2014). Algunos de sus beneficios incluyen: reducir el costo del edificio mediante el ahorro de energía eléctrica, gracias a que tienen un efecto de regulación de temperatura hacia dentro y fuera de la construcción, además evitan el efecto de isla de calor en las ciudades, permiten la captación de agua de lluvia, ralentizando o evitando el drenado de esta directamente hacia el alcantarillado, aumentan el valor estético de la construcción, se crean espacios para actividades de esparcimiento y generan un espacio para la incidencia de fauna (Stephenson, 2008).

Es importante notar que los lugares con mayor cobertura de techos verdes son de climas templados. Estos climas suponen una ventaja para el desarrollo de plantas, en términos de radiación solar, temperatura y disponibilidad de agua, en comparación con ciudades de clima cálido y seco, donde estos factores pueden presentar variaciones extremas (Dvorak y Volder, 2012; Raimondo et al., 2015).

En Norteamérica la investigación respecto a techos verdes se ha expandido durante la última década. En algunos países y ciudades las azoteas verdes basadas en estándares europeos solo son una tecnología emergente y, por lo mismo, no se ha explorado para todas las ecorregiones norteamericanas; además, por la gran diversidad de climas en Norteamérica, desde templados hasta desérticos, la selección de especies se torna más complicada. Por lo tanto se considera que se conoce poco acerca de especies viables para cubiertas ajardinadas (Dvorak y Volder, 2010, 2012) y en este contexto se hace énfasis en zonas cálidas y secas (Raimondo et al., 2015; Simmons, 2015).

La implementación de techos verdes en áreas con climas extremos, como los desiertos calientes, que presentan temperaturas extremas y baja disponibilidad de agua, es mínima. Sin embargo, recientemente, en Australia, Europa mediterránea, sur de Asia y Centroamérica se ha avanzado en la investigación enfocada a techos verdes en este tipo de climas (Simmons, 2015). Así, por ejemplo, el estudio de las respuestas fisiológicas de una selección de especies y su sobrevivencia (Farrel et al., 2012; Schneider et al., 2014; Raimondo et al., 2015) y la temperatura en un inmueble con cubierta naturada (Lerum y Thakare, 2005; Alpuche et al., 2010), son temas que se consideran de especial importancia para climas áridos debido a su relación con las variables climáticas que imponen adversidad a dichos sistemas, las cuales podrían definir su funcionamiento (Simmons, 2015). En México, sin embargo, existe muy poca implementación e investigación sobre techos verdes, con excepción de la Ciudad de México, donde los sistemas de naturación están cobrando más popularidad.

En esta tesis se presenta la construcción de un modelo preliminar de techo verde para probarse bajo las condiciones de clima cálido y seco del noroeste de México, incluyendo su efecto en la temperatura ambiente debajo del mismo, la caracterización y selección de dos sustratos, la selección de cuatro especies de plantas y su respuesta fisiológica al ambiente experimentado.

II. ANTECEDENTES

Actualmente el ser humano es consciente de las condiciones ambientales adversas que se viven en el mundo, las cuales en buena medida han sido ocasionadas por él mismo. Claro ejemplo es el aumento de la temperatura global, la pérdida de biodiversidad y ecosistemas y el incremento de contaminantes tanto en las ciudades como en zonas naturales (WWF, 2012). Son estas y más las razones que representan el principal motivo por el cual se buscan alternativas para mitigar tales condiciones; una de ellas son los sistemas de naturación urbana.

El concepto “naturación urbana” se refiere a la acción de incorporar la vegetación al medio urbano con el objetivo de amortiguar los efectos negativos que la urbanización puede ocasionar al medio ambiente. Los sistemas de naturación se pueden entender como cubiertas de vegetación que se implementan sobre la infraestructura urbana, principalmente en techos y/o fachadas de casas y edificios. Con esto se busca crear una serie de espacios verdes interconectados dentro de una ciudad, y que a su vez creen una conexión entre las urbes y las zonas naturales circundantes (Urbano-López, 2013).

Los techos verdes, también referidos como cubiertas ajardinadas, jardín de techo, azoteas verdes o vivas, forman parte de los sistemas de naturación urbana. Se afirma que un techo verde se logra cuando un esquema de plantación de vegetación es implementado sobre un techo (Green Roof Organization, 2014). Para su instalación, una azotea verde se construye sobreponiendo varias capas de diferentes materiales (figura 1), cada una con una función. Sobre el techo original se coloca una membrana impermeable anti-raíz, resistente a la punción y que evita la penetración de agua. Encima se coloca una capa drenante, donde llega a parar el agua infiltrada del sustrato, la cual consiste, por lo general, en un mosaico de conos unidos que permite el paso libre del agua hacia el sistema de drenaje, además, permite el almacenamiento de la misma, pues la parte honda de los conos funciona como un pequeño reservorio del líquido. Sobre esta última se coloca una capa filtrante con la función de retener y evitar la pérdida de partículas del sustrato, pero debe permitir el paso del agua, ya que sobre ella se instala la capa de medio de crecimiento que permite el desarrollo de plantas.

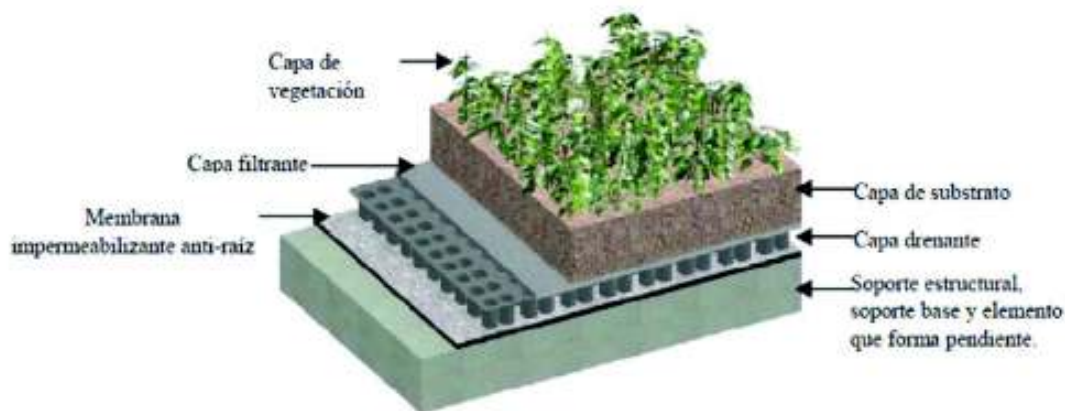


Figura 1. Estructura general de un techo verde (Fuente: Gaceta Oficial del Distrito Federal, 2008).

II. 1. Panorama Global de Los Techos Verdes

En Europa existe una mayor abundancia de techos verdes y por más de treinta años esta tecnología ha sido implementada con éxito (Stuitz, 2010; Dvorak y Volder 2010). Se afirma que fue en Alemania, Escandinavia y Suiza donde los techos verdes formalmente tuvieron su explosión como sistemas de naturación urbana, en la década de 1960 (Dvorak y Volder, 2010). En Alemania, a finales del siglo XIX, se implementaba en los techos de apartamentos de bajo costo para trabajadores industriales, una capa de grava y arena a la cual se le plantaba pasto con el propósito de cuidar la vivienda contra el fuego (Rueber, 2008 citado por Köhler, 2006). También se instalaban para proteger la estructura del techo contra los daños físicos ocasionados por la radiación solar (Oberndorfer et al., 2007).

En la era moderna se considera especialmente a Alemania como pionero en el desarrollo de la tecnología utilizada en la implementación de techos verdes. Esto se afirma en varios trabajos de investigación; sobre todo, se reconoce el manual creado por la organización alemana “Landscaping and Landscape Development Research Society” (FLL por sus siglas en alemán), como uno de los mejores documentos en materia de techos verdes, el cual contiene lineamientos de planeación, ejecución y mantenimiento de estos, cubriendo prácticamente todos los aspectos involucrados en su instalación. La primera versión del manual se publicó en el año 1975 y la

más reciente en 2002, la cual ha sido actualizada y corregida en base a investigaciones empíricas sobre techos verdes (FLL, 2002; Ngan, 2004; Dvorak y Volder, 2010;). Actualmente varias ciudades alemanas ofrecen incentivos para la instalación de techos verdes, lo cual ha tenido un efecto positivo promoviendo su implementación, resultando en un incremento anual de 13.5 millones de metros cuadrados (m²) de cobertura por cubiertas ajardinadas (Oberndorfer et al., 2007). En algunas ciudades Norteamericanas también se ofrecen incentivos a los dueños de inmuebles con techo verde, como Portland, Oregón, Chicago, Illinois (Dvorak y Volder, 2010) y la Ciudad de México.

Por sus beneficios, desde ambientales hasta económicos, los techos verdes no se han quedado aislados en una sola región. Los gobiernos de otros países y ciudades también han desarrollado sus propios manuales de planificación, normatividad y conceptos en el área, como son Canadá (Lawlor et al., 2006; Peck et al., 2003), Reino Unido (Green Roof Organization, 2014), la ciudad de Nueva York (Gruzen Samnton Architects LLP et al., 2007) y la Ciudad de México (Gaceta Oficial del Distrito Federal, 2008), por mencionar algunos ejemplos. Igualmente, las empresas privadas enfocadas al desarrollo sistemas de naturación tienen sus propios manuales, Hydrotech es un ejemplo de empresa privada ampliamente distribuida en Estados Unidos de América; por otro lado, Generación Verde es una empresa mexicana que trabaja en conjunto con la Universidad Nacional Autónoma de México. A pesar de los esfuerzos de investigación aún falta desarrollar mucha investigación sobre techos verdes a través de todas las ecorregiones norteamericanas que permitan definir guías y estándares que consideren las variaciones ambientales entre regiones (Dvorak y Volder, 2010).

II. 2. Beneficios de los Techos Verdes

Urbano-López (2013) cita en su trabajo los diversos beneficios que proveen los sistemas de naturación:

1. Disminuyen la contaminación atmosférica mediante la fijación de dióxido de carbono (CO₂), por consecuencia pueden aminorar el efecto invernadero. También contribuyen a la fijación de partículas contaminantes por medio de las plantas y el sustrato.

2. Regulan el ciclo hidrológico dentro de las ciudades por medio de la captación del agua de lluvia por parte de la vegetación y el sustrato, la cual regresa a la atmósfera por el proceso de evapotranspiración.
3. El efecto de evapotranspiración también ayuda en la regulación de temperatura, amortiguando las oscilaciones diarias de temperatura de la ciudad, provocando un efecto refrescante durante los meses más cálidos del año tanto hacia adentro del inmueble como hacia fuera.
4. Interceptan la radiación ultravioleta, impidiendo que llegue directamente hacia las superficies terrestres.
5. Por consecuencia del amortiguamiento de la temperatura hacia el interior de la construcción, también se reducen los gastos energéticos por uso de sistemas de aire acondicionado y de calefacción.

Los beneficios que proveen los techos verdes se pueden clasificar en 3 categorías: manejo de agua de lluvia, conservación de energía y provisión de hábitat urbano. Estos servicios derivan de tres componentes principales de los techos vivos: vegetación, sustrato y membranas. La capa de vegetación ayuda, mediante la sombra y transpiración, a disminuir la temperatura y regresar el agua hacia la atmósfera. El medio de crecimiento (sustrato), además de proveer sostén y recursos a la vegetación, también cumple con la función de retener el agua de lluvia, al igual que aminorar su escape hacia las calles y alcantarillado. La serie de membranas que conforman un techo verde previenen la penetración de raíces hacia la estructura base del inmueble, actúan como impermeabilizante de la superficie y también ayudan a alargar el tiempo de vida útil del techo; también debe considerarse que las diversas capas de un techo verde actúan como un buen aislante de temperatura, conservándola más baja dentro del inmueble en comparación con el exterior (Oberndorfer et al, 2007).

II. 2. 1. Techos verdes como microclimas dentro de las ciudades

La vegetación, aunada a otros factores del paisaje, tiene un papel determinante en el mantenimiento del microclima que experimentamos día a día. La heterogeneidad del paisaje puede crear microclimas únicos, diferentes al macroclima dominante, mediante la variación del

ciclo de energía y agua entre la superficie y la atmósfera (Bonan, 2002). Con el microclima de los techos verdes se busca mejorar algunas condiciones adversas de las ciudades, como las altas temperaturas provocadas por gases de efecto invernadero y el calentamiento del asfalto y concreto de las construcciones. El efecto de los techos verdes depende del clima regional; en climas cálidos y secos se espera que su beneficio, en el contexto energético, sea el refrescar tanto la temperatura exterior como la interior (La Roche y Berardi, 2014).

Estos microclimas únicos se producen debido a que en la superficie del dosel de vegetación ocurre el intercambio de energía radiante con la atmósfera, así como el flujo de gran cantidad de vapor de agua por transpiración, lo que permite el mantenimiento de microclimas más benignos, en comparación con los que se experimenta en una superficie sin vegetación. El microclima alrededor de una planta podría diferir significativamente de la temperatura del aire atmosférico. Esto se debe a la capacidad que tienen las hojas de balancear la energía aprovechada y emitida (Lambers et al., 2008). Los principales procesos involucrados en la temperatura del dosel son: 1) La captación de radiación solar por las hojas, 2) intercambios de radiación de onda larga entre las hojas con otras hojas, la superficie del suelo y la atmósfera, 3) transferencia de calor convectivo entre hojas y la atmósfera y entre el suelo y la atmósfera, 4) evapotranspiración, 5) Transferencia de calor latente y sensible entre el aire cercano al dosel y el aire fuera del dosel (Del Barrio, 1998). Estas son las propiedades que se aprovechan en un techo verde, gracias a las cuales se obtiene el servicio de regulación de temperatura.

II. 3. Clasificación de los Techos Verdes

Existe una clasificación de los techos verdes en base a sus características de profundidad de sustrato, el tipo de plantas y el uso que se le da a la cubierta, el cual puede ser recreativo, de esparcimiento o solo aprovechamiento de los servicios ambientales brindados por una cubierta ajardinada. Generalmente se distinguen tres tipos de azoteas verdes: extensivas, intensivas y semi-intensivas (FLL, 2002; Green Roof Organization, 2014; Gruzen Samnton Architects LLP et al., 2007; Gaceta Oficial del Distrito Federal, 2008).

Los techos verdes extensivos, por sus propiedades, se pueden considerar los más sencillos: la capa de sustrato es delgada (de 4 a 15 cm de profundidad), soportan plantas específicamente de porte pequeño, con un sistema radicular poco profundo, de necesidades mínimas o nulas de riego y resistentes a condiciones climáticas adversas; es muy común el uso de suculentas de la familia Crassulaceae, en especial el género *Sedum*; también pueden ser implementadas especies nativas a la región. Otras de las características que distinguen el techo extensivo son: 1) el bajo mantenimiento y costo, 2) no es accesible al público, 3) de los tres tipos de techos este es el que representa menos carga adicional al techo del inmueble (Tabla I); los componentes del sustrato son, en su mayoría, de origen mineral y deben ser ligeros. Sin ser un espacio recreativo, este tipo de cubierta aporta beneficios en términos de servicios ambientales, como la regulación de temperatura, generación de oxígeno, captación de agua, reducción de ruido, amenidad visual y espacio para fauna (FLL, 2002; Green Roof Organization, 2014; Gruzen Samnton Architects LLP et al., 2007; Gaceta Oficial del Distrito Federal, 2008).

Las azoteas verdes intensivas son creadas con el principal propósito de proveer un espacio de recreación y esparcimiento. Una de sus principales distinciones es una capa de sustrato que puede llegar a los dos metros de profundidad, y es esta propiedad la que permite utilizar plantas de prácticamente cualquier forma de vida (herbáceas, arbustos, árboles o suculentas), siempre y cuando no sean nocivas para la salud humana ni de reproducción restringida, y sobre todo, que sean aptas a las condiciones climáticas de la zona; además se busca que sean accesibles al público. Por lo anterior, los techos verdes intensivos suponen un costo mayor comparado con los extensivos; requieren de constante mantenimiento (como riego, fertilización y poda) y mayor seguridad en la instalación, en especial por el gran peso del sistema (tabla I) (FLL, 2002; Green Roof Organization, 2014; Gruzen Samnton Architects LLP et al., 2007; Gaceta Oficial del Distrito Federal, 2008).

Los techos verdes semi-intensivos no tienen características tan marcadas o distintivas como los dos tipos anteriores y se afirma que poseen una combinación de las propiedades de ambos. Se llega a entender que para este tipo de techos se considera una variedad de plantas casi tan grande como la de los techos intensivos, aunque se presenta la restricción ocasionada por la profundidad del sustrato en relación al sistema radicular y requerimiento de recursos de las especies, lo cual puede variar, y otras consideraciones bióticas y abióticas (FLL, 2002; Green Roof Organization, 2014; Gruzen Samnton Architects LLP et al., 2007; Gaceta Oficial del

Distrito Federal, 2008). Como ejemplo se puede pensar en el desarrollo de alguna especie de arbusto (los arbustos son usualmente usados en techos intensivos) con un sistema radicular poco profundo en un sustrato de 15 cm de altura (la poca profundidad de sustrato es típica de un techo extensivo), el cual puede depender de un sistema de irrigación y ser frecuentado por personas. Los modelos experimentales del presente trabajo entrarían dentro de esta categoría de techos verdes.

Tabla I. Valores de carga adicional al techo del inmueble por tipo de techo verde en estado saturado (Gaceta Oficial del Distrito Federal, 2008).

Tipo de naturación	Extensiva	Semi-intensiva	Intensiva
Carga adicional	110-140 kg/m ²	250 kg/m ²	>250 kg/m ²

Revisando los diversos manuales referentes a techos verdes, se puede concluir que no hay uniformidad entre ellos en algunos aspectos. En el caso de la proporción de componentes orgánicos del sustrato, Gruzen Samnton Architects LLP et al. (2007) (manual para la ciudad de Nueva York) mencionan que ésta debería ser de 45% para techos intensivos y 15 a 20 % para extensivos, mientras que FLL (2002) afirma un máximo del 12% para intensivos y 8% máximo para extensivos. Por otro lado la Gaceta Oficial del Distrito Federal (2008) da a entender que para intensivos, la proporción de material poroso inorgánico debería ser de 70% y en extensivos del 50% y el resto se considera orgánico (se aclara que en la última referencia no se especifica claramente la proporción exacta de materia orgánica). A pesar de esto, se entiende que cada manual se desarrolle acorde a las demás consideraciones involucradas en la instalación de techos verdes propias de cada región, y que muy probablemente varíen entre ciudades y países.

II. 4. Consideraciones Técnicas para la Instalación de Techos Verdes

La instalación de techos verdes tiene muchos aspectos a considerar, desde biológicos hasta ingenieriles. Los aspectos de ingeniería son de gran importancia, ya que la construcción de un techo verde requiere de una infraestructura específica que considere la instalación de este

sistema de naturación como parte integral de toda la obra, para no comprometer la seguridad de esta y la civil (Gaceta Oficial del Distrito Federal, 2008).

En los manuales sobre techos verdes que ya se han citado en este trabajo se definen los aspectos técnicos en torno a estos sistemas. Por su cercanía regional y política, la información de este apartado proviene de la Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-013-RNAT-2007 (Gaceta Oficial del Distrito Federal, 2008), que establece especificaciones técnicas para la instalación de techos verdes en el Distrito Federal, México; a su vez, esta hace referencia a otras normas y reglamentos de la misma zona política.

El peso extra del sistema de naturación sobre el techo del inmueble es una consideración universal, es decir, para la instalación de cualquier techo verde debe tomarse en cuenta este aspecto, principalmente por cuestiones de seguridad civil. Como se muestra en la tabla I, la carga varía dependiendo del tipo de azotea verde. Cada una de las capas del sistema representa una carga adicional, esta aumenta si se considera la capa de sustrato a saturación de agua, y el crecimiento de las plantas en el tiempo, que agregaría aún más peso. Tales factores podrían determinar el futuro de la obra, pues si el techo del inmueble no resulta apto para soportar tal carga adicional la instalación no sería posible, a menos que se considere reforzar la estructura original.

Actualmente, en la planeación de nuevas edificaciones se toman en cuenta los rasgos técnicos de los techos verdes. Para tal caso se deberían considerar aspectos como: el soporte de la carga adicional, que se tenga una pendiente mínima de la superficie del 2%, el espacio destinado a los equipos de servicios básicos sobre el techo, la instalación de sistemas de desagüe del agua infiltrada por el techo verde, los pretilos del techo, entre otros.

Además de la estabilidad y resistencia mecánica, otro aspecto importante es acondicionar el techo con impermeabilizantes especiales hechos de materiales de larga vida útil, pues deben ser lo suficientemente resistentes a la acción mecánica de las raíces, a la penetración del agua y a la compresión. Otra cuestión que debe evitarse es el estancamiento de agua en las capas inferiores del sistema, por lo cual debe asegurarse la libre salida del agua a través de la capa drenante; aquí la actividad microbiana y la humedad podrían tener efectos negativos sobre todo el sistema. También, la mezcla de sustrato debe ser porosa para que permita la infiltración rápida de agua hacia las capas inferiores, pero además, debe tener buena retención de agua para

asegurar la vida de las plantas. A todo lo anterior debe aunarse el uso de materiales que además de resistentes, sean poco densos.

Dando cuenta de las consideraciones técnicas, el panorama entorno a la instalación de techos verdes se vuelve más complicado. Es importante entender que la ejecución de estos sistemas es de carácter interdisciplinario (Dvorak y Volder, 2010) y las empresas dedicadas a la naturación de zonas urbanas deben estar concientes de las normas, reglamentación y materiales calificados en la ejecución de techos verdes.

II. 5. Plantas para un Techo Verde

Las condiciones ambientales que se experimentarían en un techo verde son desafiantes para el desarrollo de plantas. Los principales factores estresantes son: la baja disponibilidad de agua, las temperaturas elevadas, intensidades de luz altas y vientos fuertes. Por estas razones es necesaria la selección de especies, ya que se busca que la paleta vegetal (conjunto de especies vegetales propicias para el crecimiento en techos verdes) sea adecuada para las condiciones climáticas de la ciudad en la que se instalará el techo verde (Oberndorder et al., 2007; Raimondo et al., 2015) (tabla II). Algunas características que pueden influir en la tolerancia a las condiciones ambientales de las plantas de un techo verde son: la succulencia de hojas, metabolismo CAM (metabolismo ácido de las crasuláceas), follaje siempre verde y de amplia cobertura, crecimiento compacto. Además, existe la opción de implementar nativas de la región o especies de floras de regiones con climas extremos, o parecidos a la zona donde se desea instalar el techo verde (Gaceta Oficial del Distrito Federal, 2008; Oberndorder et al., 2007). Se debe tener muy en cuenta la no introducción de especies que podrían resultar agresivas para la flora nativa o que pudieran afectar la salud humana, como alergias por polen.

Las características funcionales de la planta son factores determinantes en el desempeño de plantas y de los servicios ambientales que ofrecen (Lundholm et al., 2010). Por lo general es recomendado el uso de especies cuya vía fotosintética sea la del Metabolismo Acido de las Crasuláceas (CAM por sus siglas en inglés) (Simmons, 2015). Las plantas CAM presentan cierre estomático diurno, evitando la pérdida de agua por transpiración durante las horas más calientes

del día, y así presentan un eficiente uso del agua (Lambers et al., 2008). Generalmente son plantas suculentas las que presentan este tipo de metabolismo fotosintético, y el nombre hace referencia a la familia de plantas carnosas Crassulaceae, aunque es bien sabido que existen plantas CAM con diferentes formas de vida (incluso helechos), siendo de 25 a 30 familias taxonómicas las que incluyen especies con esta vía metabólica (Lambers et al., 2008). De hecho es muy común en techos verdes el uso de especies del género *Sedum*, el cual pertenece a la familia Crassulaceae. En general se recomienda el uso de especies suculentas también por tener sistemas radiculares someros (Dvorak y Volder, 2010), lo cual es una buena opción para techos con un medio de crecimiento poco profundo, como los extensivos.

Se han usado otros géneros de plantas suculentas en techos verdes. Dvorak y Volder (2010), en su revisión de las plantas usadas en techos verdes en diferentes ecorregiones de Norteamérica, listan las especies suculentas probadas en diferentes trabajos de investigación, de las cuales los géneros (familia entre paréntesis) son: *Sedum* (Crassulaceae), *Delosperma* (Aizoaceae), *Opuntia* (Cactaceae), *Rhodiola* (Crassulaceae), *Portulaca* (Portulacaceae), *Sempervivum* (Crassulaceae).

El nicho ecológico representa un conjunto de condiciones y factores ambientales ideales para la supervivencia y reproducción de determinada especie; cuando no se toma en cuenta la interferencia por otras especies, a este se le denomina nicho fundamental (Smith y Smith, 2007). Este concepto es útil para la selección de especies para techos verdes, ya que se recomienda que bajo climas cálidos se elijan especies con un nicho ecológico amplio, es decir, que sean capaces de soportar condiciones ambientales muy variables, sobre todo en cuanto a la temperatura del aire y suelo y a la disponibilidad de agua (Simmons, 2015). Como ejemplo se puede pensar en que un buen candidato, para un techo verde en una ciudad de clima cálido, sería alguna especie que se desarrolle naturalmente tanto en climas cálidos como templados; mientras que una especie endémica a una región de clima templado o frío podría ser descartada bajo el criterio de nicho. Por eso es que se recomienda también el uso de especies endémicas o nativas a la zona donde se desea implementar los techos verdes, o nativas de regiones con un clima similar, en cuyo caso se esperaría el éxito de la planta sobre el techo verde (Dvorak y Volder, 2010).

Tabla II. Comparación entre algunas variables bióticas y abióticas que se esperaría se presenten en los techos verdes de climas templados y árido - cálidos (modificado de Simmons, 2015).

		Clima templado	Clima cálido - árido
Condiciones en el techo	Temperatura máxima	Moderada	Alta
	Temperatura mínima	Baja	Moderada
	Periodo constante de temperatura alta	Infrecuente	Frecuente
	Periodo constante de temperatura baja	Frecuente	Infrecuente
	Periodo constante de saturación	Frecuente	Ocasional
	Periodo constante de sequía	Infrecuente	Frecuente
Tipo de plantas deseadas	Suculenta de clima frío	Sí	
	Suculenta de clima cálido		Sí
	Herbácea de clima frío	Sí	
	Herbácea de clima cálido		Sí
Características del medio de crecimiento	Drenaje	Bueno a pobre	Bueno a moderado
	Retención de agua	Bajo a moderado	Alto
	Conductividad térmica	Moderada	Baja

Se busca utilizar en techos verdes especies de plantas con follaje siempre verde y que proporcionen una cobertura amplia, de preferencia en el menor tiempo posible, pues así se

lograría disminuir la temperatura del aire circundante mediante dos procesos: la reflectividad y la evapotranspiración. Por medio de la alta reflectividad de las hojas la capa vegetal se mantiene a una temperatura relativamente menor, en comparación con la superficie desolada de un techo convencional, la cual puede presentar una reflectividad (también conocida como “albedo”) de hasta 5 %, lo que significa que el 95 % de la luz incidente en la superficie es absorbida y transformada a calor, mientras que se ha encontrado que un techo verde puede tener un albedo de 20% (Gaffin et al., 2010). Lundholm et al. (2010) determinaron que el albedo para un techo convencional es de 6.6% y de 18.0 a 19.5% para módulos experimentales con vegetación. La energía solar que llega a las hojas incrementa su temperatura, esta energía es disipada por la planta a través de la pérdida de vapor de agua de la hoja a la atmósfera en el proceso de transpiración, lo que permite a la planta mantenerse a una temperatura funcional (Lambers et al., 2008). La radiación solar también provoca la evaporación del agua presente en el medio de crecimiento. Ambos fenómenos se sintetizan en un proceso denominado evapotranspiración, al cual se le atribuye el efecto refrescante en el aire exterior por parte de la cubierta vegetal y del medio de crecimiento en conjunto (Oberndorder et al., 2007).

Es importante que en un techo verde se implementen mezclas de diferentes especies y evitar los monocultivos, ya que se ha demostrado que la diversidad específica y de formas de vida mejora la calidad de servicios ambientales, aunque no es estrictamente una regla. Esto se ha probado en el trabajo de Lundholm et al. (2010), en el cual se determinó la temperatura superficial ($^{\circ}\text{C}$ a un cm de profundidad en el medio de crecimiento), albedo, captura de agua (expresada en kg de agua capturada) y evapotranspiración (expresada como kg de agua perdida), a partir de módulos con diferentes tratamientos instalados en un techo: 1) controles sólo con medio de crecimiento, 2) mezclas de entre 15 especies representativas de 5 diferentes formas de crecimiento (arbustos, herbáceas, pastos, suculentas y herbáceas altas), 3) cultivo de una sola forma de crecimiento y 4) cultivos mono-específicos. Probaron la hipótesis de que a mayor diversidad de formas de vida mayores son los beneficios obtenidos por un techo verde. En promedio, y comparado con la temperatura de un techo convencional, en los controles se redujo la temperatura superficial hasta en 10°C , en los monocultivos 12°C y en las mezclas 13.5°C , aunque hubo monocultivos que también tuvieron un desempeño equivalente al de las mezclas; específicamente el de la especie *Solidago bicolor* (familia Asteraceae) tuvo el mejor desempeño de temperatura entre todos los tratamientos. Se correlacionó la baja temperatura con el albedo y

riqueza de especies, así en promedio, los módulos más diversos y de mayor albedo mostraron la menor temperatura superficial. También se determinó que la reflectividad puede incrementarse mediante el uso de varias formas de vida o de los mejores monocultivos, como el de *S. bicolor*, el cual tuvo el mayor albedo entre todos los tratamientos. En promedio los tratamientos con diferentes mezclas de formas de vida capturaron más agua que los monocultivos, aunque no más que los controles. Se encontró además que la baja diversidad de doseles ralentizaba la evaporación, evitando así la captura de un mayor volumen de agua en el siguiente evento de lluvia; también se encontró que la mezcla de diferentes especies de pastos capturó más agua que los cultivos mono-específicos; se concluyó que la diversidad de formas maximizó la captación de agua. Ningún módulo con solo una forma de vida optimizó todos los servicios, pero combinando herbáceas altas, pastos y suculentas se obtuvo el mejor resultado para todos los servicios ambientales, tal caso no ocurrió con la combinación de las 15 especies en conjunto. Muchas de las especies utilizadas en el experimento se distribuyen en Norteamérica y Europa, por lo cual se hace énfasis en que el desempeño de las especies, y por consecuencia los servicios ambientales, pueden estar influenciados por el tipo de clima donde se llevó a cabo el trabajo, en este caso templado. Finalmente se concluye que en realidad se mejoran los valores de algunos servicios ambientales mediante el uso de diversas formas de vida y especies, aunque es importante seleccionar las mejores conociendo previamente las características aisladas de cada planta, para así formar combinaciones que aseguren el mejor desempeño de sus funciones; además, los cultivos mono específicos o de una sola forma de vida no necesariamente ofrecen menos beneficios.

II. 6. Instalación y Mantenimiento de Plantas para un Techo Verde

Las plantas destinadas a instalarse en un techo verde se obtienen a partir de diversos métodos de propagación o lugares de origen. La capa vegetal puede ser instalada según los siguientes métodos (Green Roof Organization, 2014):

1. Manto de vegetación: consiste en una capa de área definida con vegetación pre- cultivada que se instala sobre el medio de crecimiento y se acomodan varias en mosaico para

proveer al instante una cobertura casi total. Una vez colocadas se debe aplicar riego constante durante cuatro a seis semanas. Mediante este método la diversidad de especies de plantas es previamente definida por el proveedor del producto; existen mantos de *Sedum*, de pasto y de flores silvestres.

2. Plantas con cepellón: es posible utilizar plántulas o plantas en etapa temprana de crecimiento mediante su previa siembra en charolas de compartimentos individuales, posteriormente se transplantan junto con el cepellón (bloque de sustrato adherido a las raíces) al medio de crecimiento del techo verde. De esta manera se tiene más control sobre la diversidad y distribución de las especies en el área, aunque solo provee de cinco a diez por ciento de cobertura inicial pero aumenta conforme al desarrollo de las plantas.
3. Siembra de semillas o plantado de estacas: consiste en la dispersión de semillas y/o colocación de estacas sobre el sustrato del techo verde, cubriéndolas con mantillo húmedo para que posteriormente germinen o enraícen, según sea el caso. La distribución se lleva a cabo manualmente y debe usarse una mezcla de mínimo seis especies. Al inicio se obtiene muy poca cobertura, pero aumenta conforme al desarrollo de las plantas.

Cuando se opte por el transplante de vegetación joven o madura, los individuos deberán contar con las siguientes características (Gaceta Oficial del Distrito Federal, 2008):

- Planta visiblemente vigorosa
- Follaje del color característico para la especie y sin pigmentación artificial
- Sistema radicular bien desarrollado, con un cepellón estabilizado y compacto
- La raíz no deberá presentar daños o malformaciones
- Las plantas deberán tener por lo menos 1.5 meses de desarrollo
- La planta que presente daño en el sistema radicular o que venga con la raíz desnuda no podrá ser sujeto de plantación.

II. 6. 1. Propagación vegetativa de plantas

La propagación vegetativa se considera un tipo de reproducción asexual de las plantas y se trata de un proceso que implica la separación y el enraizamiento de una parte de la planta original, y

a partir de esta se desarrolla directamente un nuevo individuo genéticamente idéntico. En muchas especies este tipo de reproducción predomina sobre la sexual, pues las condiciones ambientales no facilitan el establecimiento de un nuevo individuo a partir de semillas, como ocurre con algunas cactáceas y otras xerófitas (Vázquez-Yanes et al., 1997).

La propagación vegetativa inducida mediante segmentos de planta es uno de los métodos más usados para propagar plantas leñosas en vivero. Se utilizan tejidos que conserven la potencialidad de multiplicación y diferenciación celular para generar nuevos tallos y raíces. Como ejemplo, la propagación de segmentos foliados no lignificados implica la selección de tallos nuevos y en crecimiento activo, los cuales se generan a finales de la primavera o principios del verano. Algunas consideraciones para obtener estacas (tallos de una planta madre) y asegurar su enraizamiento son las siguientes (Vázquez-Yanes et al., 1997):

1. Se recomienda cortar tallos (de entre 3 y 10 cm de longitud) cercanos al tronco principal o al eje de crecimiento vertical a partir de plantas donantes vigorosas. Las estacas deberán mantenerse húmedas entre que son cortadas y plantadas.
2. Las estacas se colocan de dos a tres cm de profundidad en el sustrato, asegurando su firmeza y que no haya contacto de hojas con el suelo. Se recomienda el uso de sustancias enraizadoras como el ácido indolbutírico (AIB) o el naftalenacético (ANA) El enraizado en muchas especies inicia a partir de la segunda semana y en la cuarta el individuo está listo para transplantarse.
3. Por ser estacas con hojas adheridas, la pérdida de agua por transpiración representa un riesgo para el posterior enraizado, por lo tanto se recomienda mantener la humedad del aire alta y reducir el área foliar mediante la eliminación de hojas, aunque debe considerarse que una gran área foliar ocasiona mayor pérdida de agua y una baja no asegura suficientes nutrientes.
4. Intensidad moderada de luz y mantener temperaturas estables de entre 20 y 25° C. A mayores temperaturas se debe asegurar una mayor humedad del aire para evitar el marchitamiento. La luz debe ser suficiente para activar la fotosíntesis, lo cual se puede lograr mediante el uso de mallas especiales.
5. Usar un medio favorable de enraizamiento con buena retención de agua y bien aireado. Un buen sustrato se logra utilizando arena gruesa o grava fina, adicionada con algún

material que mejore la retención de agua, como turba o vermiculita. Se debe mantener el sustrato húmedo.

III. 6. 2. Germinación de semillas

La semilla es el principal órgano reproductivo de la gran mayoría de las plantas superiores terrestres y acuáticas. Se forma a partir del óvulo vegetal después de que ha sido fertilizado por el gameto masculino (contenido en los granos de polen). La semilla consta de varias estructuras; las principales capas que la componen son: 1) la testa, que es la cubierta de la semilla; 2) el endospermo, que constituye reservas energéticas para el embrión y 3) el embrión, que emergerá de la semilla bajo condiciones propicias de humedad, luz y nutrientes y crecerá para posteriormente dar lugar a una planta madura (Vázquez–Yanes et al., 1997).

La germinación de semillas comprende tres etapas sucesivas que se superponen parcialmente: 1) la absorción de agua por imbibición, que causa hinchamiento y la ruptura de la testa, 2) el inicio de las actividades fisiológicas involucradas en el crecimiento del embrión y 3) el crecimiento y la división celular que provoca la emergencia de la radícula (de la que se desarrollarán las raíces) y la plúmula (de la que se desarrollará el tallo) (Vázquez–Yanes et al., 1997).

Cuando las semillas llegan al suelo, el recurso clave para iniciar el proceso de germinación es el agua. La velocidad a la cual la semilla absorbe agua varía entre especies y depende en gran medida de la permeabilidad de sus cubiertas, la composición química de sus reservas, su tamaño, contenido de humedad, humedad del suelo y del aire, al igual que la temperatura (Vázquez–Yanes et al., 1997).

La mejor manera de saber sobre la viabilidad de semillas recolectadas de plantas silvestres es mediante una prueba de germinación; existen otros métodos que son más complejos y además caros, como la prueba con tetrazolio o el uso de respirómetros. Se debe conocer la forma adecuada para germinar y/o romper la latencia de las semillas de determinada especie, por lo cual, es recomendado aplicar una serie de tratamientos según sea el caso. Si no se conocen los requerimientos específicos para inducir la germinación debe efectuarse una prueba sencilla,

en la cual las semillas se colocan a una temperatura de entre 20 y 27° C (en la que germinan muchas especies), en un sustrato húmedo apropiado (papel absorbente, suelo, papel filtro, entre otros) y a la luz; si no germinan bajo tales condiciones puede significar que existan varios factores que lo impidan, los cuales pueden estar estrechamente relacionados con el proceso natural de germinación, para lo cual se deben simular las condiciones ambientales propicias para este proceso. Si ocurre esto último, se recomienda realizar pruebas en las que se apliquen estímulos químicos, cambios de hidratación, probar nuevas condiciones de temperatura, almacenar las semillas a baja temperatura o en temperatura ambiente para esperar el fin de la latencia y también hacer pruebas de viabilidad (como la del tetrazolio). Otros factores pueden ser que el embrión no esté completamente desarrollado o algún problema durante la colecta de la muestra (Vázquez–Yanes et al., 1997).

II. 6. 3. Mantenimiento de las plantas

Los techos verdes en cierto punto requieren de algún tipo de mantenimiento, el cual varía dependiendo del tipo de azotea (intensiva, extensiva o semi-intensiva); en este contexto se incluye el cuidado de las plantas, desde su siembra hasta su desarrollo en el techo verde.

Las siguientes actividades de mantenimiento y cuidado se enlistan en el manual de la FLL (2002) y pueden aplicarse a los tres tipos de techos verdes, aunque estas tareas deberán adaptarse a cada sitio en específico de acuerdo con las condiciones ambientales y el tipo de plantas usadas; la NADF-013-RNAT-2007 describe algunos de estas actividades:

1. Riego inicial para asegurar el establecimiento de plantas, sobre todo para la germinación y enraizado de semillas y estacas.
2. Riego intermitente. Dependiendo del tipo de techo, las especies vegetales y la estación del año la aplicación de riego variará. Para extensivos por lo general se busca el riego nulo y un desarrollo autónomo de la vegetación, mientras que en intensivos es más recomendada la instalación de sistemas de riego, ya sea por goteo o micro aspersión, cuidando que el agua sea absorbida lentamente por el medio de crecimiento sin crear escorrentía superficial.

3. Fertilización. Se recomienda el uso de abonos de liberación lenta; al haber alcanzado una cobertura del 85% se suspendería el uso de fertilizantes, a menos que sea necesario lo contrario.
4. Eliminar vegetación no deseada. Se debe llevar a cabo manualmente, sobre todo durante la fase inicial de establecimiento de vegetación; si se considera no perjudicial es posible dejarla desarrollar.
5. Poda. Se hace para controlar el crecimiento; de ser posible el material vegetal sobrante puede ser usado para cubrir parches vacíos con estacas.
6. Siembra y transplante cuando sea necesario cubrir parches vacíos o sustituir vegetación.
7. Control de plagas. Siempre usar materiales certificados y manejados por personal calificado; incluir avisos de prevención cuando se apliquen plaguicidas.
8. Mantener instalaciones de servicios y andadores libres de vegetación mediante control de crecimiento y limpieza de hojas muertas.

II. 7. Techos Verdes en Zonas de Clima Cálido y Seco

En climas cálido-áridos las condiciones de poca precipitación y temperaturas altas representan los principales impedimentos para el diseño e implementación de techos verdes. Debido a tales factores, las plantas pueden experimentar eventos de estrés por temperaturas altas, tanto en hojas como en raíces, y sequía prolongada del sustrato. Por lo tanto la planeación de techos verdes en este tipo de climas debe ser diferente a los métodos convencionales utilizados para climas templados, incluyendo la selección de plantas y composición del medio de crecimiento (Simmons, 2015) (tabla II).

En muchos aspectos, los techos verdes representan una tecnología novedosa e hipotéticamente su uso es más justificado para climas cálidos, pues mitigarían algunos de los factores que dificultan su misma implementación; pero la falta de conocimiento, el registro de casos fallidos y la poca presencia inhiben el desarrollo de tal tecnología en este tipo de climas. En la última década se han registrado investigaciones en el tema de techos verdes en algunas

regiones cálidas como: Australia, sur de Asia, Europa mediterránea, Centroamérica y Norteamérica (Dvorak y Volder, 2010; Dvorak y Volder, 2012; Simmons, 2015).

En la revisión de Dvorak y Volder (2010) se afirma que para la zona de Norteamérica se tiene poco conocimiento acerca de las especies viables para techos verdes. Se menciona en el trabajo que un vivero alemán especializado en plantas para techos verdes tiene catalogadas más de 3000 plantas, mientras que en la revisión solo se encontraron 40 especies de suculentas y 94 de herbáceas viables para diferentes ecorregiones de Norteamérica, aunque no se especifica para regiones áridas.

El desarrollo de techos verdes en zonas de clima árido es un tema de investigación que está siendo atendido desde varios puntos de vista, que incluyen: los efectos de temperatura dentro del inmueble con cubierta naturalada, las respuestas fisiológicas de una selección de especies vegetales y su relación con el tipo de sustrato; a su vez, se estudia la dinámica del agua que existe en diferentes mezclas de sustrato. Los trabajos se realizan ya sea en simulaciones en ordenadores, en techos verdes instalados o en modelos experimentales a pequeña escala.

II. 7. 1. Efecto térmico de techos verdes en zonas áridas

En México la investigación sobre techos verdes no se ha enfocado tanto a climas áridos y hasta la fecha solo se ha encontrado una publicación referente a techos verdes enfocada a la ciudad de Hermosillo, Sonora. Este trabajo fue realizado por Alpuche et al. (2010), del Departamento de Arquitectura y Diseño de la Universidad de Sonora y tuvo como objetivo demostrar el efecto térmico de una cubierta ajardinada sobre una vivienda común de la ciudad y, por consecuencia, observar el ahorro de energía eléctrica de la misma. El experimento consistió en la simulación de una vivienda por medio de un software especializado (Design Builder). Se evaluó el comportamiento térmico de ésta bajo dos tratamientos: con naturación y sin naturación. Las propiedades térmicas de materiales y el consumo energético se basaron en el diseño generado y datos del mismo programa de computadora. Una parte del trabajo consistió en mediciones por hora, de las 7:00 a las 18:00 horas durante un solo día, comparando la temperatura de un techo desolado con la de un techo con cubierta naturalada con pasto; en los resultados se calculó una

diferencia de temperatura de hasta 8° C menos en el techo verde en comparación con el techo cubierto solo con un impermeabilizante común. Otra parte de la investigación reporta los promedios de temperatura dentro de una vivienda con techo verde y otra sin este. Para esto se observó una disminución de hasta 5° C dentro de la vivienda naturalada en comparación con la temperatura exterior y de 6° C menos que la temperatura interior de una vivienda con techo de concreto. Además, se concluyó que, en promedio, mensualmente se obtendría un ahorro energético del 16% sobre el consumo total en la misma vivienda con uso de aparato de refrigeración combinado con un techo verde, en comparación de un techo normal con el mismo sistema de aire acondicionado. Las conclusiones de este trabajo son positivas; la simulación puede dar indicios de que en una ciudad con clima como el de Hermosillo los techos verdes pueden proveer de beneficios, aunque también es muy importante la experimentación *in vivo*, para conocer de una forma más empírica, o cercana a la realidad, los efectos y reacciones que una cubierta ajardinada tiene bajo condiciones climáticas reales.

Otro trabajo realizado en una ciudad de clima desértico es el de Lerum y Thakare (2005), el cual se llevó a cabo en la ciudad de Tempe, Arizona, en los Estados Unidos de América (EUA). El objetivo de dicha investigación fue observar los efectos térmicos de cinco modelos diferentes de techo a pequeña escala bajo las condiciones climáticas de la ciudad. Se utilizaron cajas forradas de unicel (poliestireno expandido) y en su superficie superior se colocaron los diferentes tratamientos: 1) sin naturación y con cubierta de unicel blanco (control); 2) 75 mm de tierra sin vegetación; 3) sistema de techo verde con herbáceas e irrigado; 4) sistema de techo verde xerófito sin irrigación; 5) cubierta de unicel blanco sombreada con malla. Se reportó el efecto térmico de los modelos durante lo que se clasificó como un día típico de verano (temperatura máxima de 40° C en el día y temperatura mínima de 23.1° C en la noche). Los resultados se resumen en la Tabla III.

Tabla III. Resumen de resultados del trabajo de Lerum y Thakare (2005)

Modelo de techo	Resultado
1 - Sin naturación y con cubierta de unicel blanco (control)	Hasta 14° C sobre la temperatura ambiental en la superficie del modelo.
2 - 75 mm de tierra sin vegetación	Hasta 17° C sobre la temperatura ambiental justo bajo la capa de tierra.
3 - Sistema de techo verde con herbáceas e irrigado	Temperaturas de 6 a 11° C menores a la ambiental, en la sección justo bajo las capas del techo verde. Único que disminuyó la temperatura hacia dentro del espacio cubierto con el sistema, con diferencia de hasta 5° C de la temperatura ambiente.
4 - Sistema de techo verde xerófito sin irrigación	Altas temperaturas en la sección justo bajo las capas del techo verde pero no tanto como el modelo 2.
5 - Cubierta de unicel blanco sombreada con malla	Aumentó en su superficie 8.5° C sobre la temperatura ambiental.

De acuerdo con lo anterior, se concluye que en climas áridos es posible observar efectos térmicos por parte de los techos verdes hacia el interior del inmueble, lo cual depende en gran

medida del diseño y tipo de techo, porque se demostró que incluso pueden ser contraproducentes bajo ciertas condiciones y características estructurales. También se recomienda el uso correcto del agua para riego, lo cual es un dilema, ya que como se observa en la tabla III, un suelo húmedo tiene un efecto térmico positivo; sin embargo, en climas desérticos esto podría representar un factor limitante.

II. 8. Fisiología de Plantas Enfocada a Techos Verdes

Se recurre al estudio de las respuestas fisiológicas de diferentes especies de plantas con el fin de refinar la selección de la paleta vegetal para un techo verde. Este tipo de trabajos se realizan observando el comportamiento de algún carácter fisiológico de la planta frente a alguna condición externa que pueda incidir sobre un techo verde, y que además provoque estrés. En el contexto de fisiología vegetal, el estrés fisiológico se define como cualquier factor biótico o abiótico que reduzca, por debajo del potencial definido por el genotipo, el crecimiento y reproducción de la planta (Osmond et al., 1987).

Algunos trabajos se enfocan específicamente a tratar el tema de estrés vegetal provocado por factores abióticos que pueden presentarse en climas secos y calientes. Uno de ellos es el de Farrel *et al.* (2012), el cual prueba la resistencia a la sequía de cinco especies suculentas (*Sedum pachyphyllum*, *S. clavatum* y *S. spurium* de la familia Crassulaceae y *Carpobrotus modestus* y *Disphyma crassifolium* de la familia Aizoaceae), en tres sustratos de diferente composición y capacidad de retención de agua (CRA), para ello comparan dos tratamientos de riego: constante y nulo; el estudio es realizado bajo condiciones de temperaturas altas (máxima diaria de 49° C durante el día y 28° C en la noche) y en macetas individuales por planta y especie durante 113 días. En general, la condición de riego nulo redujo los días de vida, que difirieron entre especies, siendo *D. crassifolium* y *C. modestus* las que menos tiempo de vida tuvieron (hasta 23 días menos que el resto). También hubo diferencias entre los sustratos, siendo en promedio para todas las especies mayor el tiempo de vida en la mezcla con mayor CRA (12 días más). Se observó que las dos especies que murieron primero mostraron un mayor uso del agua, es decir, el contenido de agua de los sustratos con estas especies llegó al nivel mínimo muchos días antes

que el resto. Esto influyó en su tiempo de vida corto, en comparación con las especies de *Sedum*, a las cuales se atribuye un periodo largo de vida en condiciones secas debido a una poca generación de biomasa y alta succulencia de hojas en la mayoría de los casos. Este trabajo muestra las ventajas de probar diferentes especies en diferentes sustratos, con lo que demuestran que el comportamiento de las plantas difiere según las características del medio de crecimiento; además muestra las ventajas del uso de especies suculentas y de desarrollo lento en condiciones estresantes, como la sequía en este caso.

En el estudio de Dvorak y Volder (2012), realizado en una región de clima húmedo subtropical en Texas, EUA, se siguió la sobrevivencia 15 especies de plantas (en su mayoría suculentas) en módulos de techo verde con las siguientes condiciones: una sola mezcla de sustrato (de 11.4 cm de profundidad) e irrigación solo en las semanas iniciales del experimento, después solo dependieron de las lluvias incidentes durante un año. Se recalca que la selección de plantas se hizo de acuerdo a las características típicas para techos verdes, es decir, fue una selección variada de nativas y exóticas, con sistemas radiculares someros, resistentes a la sequía y hábito suculento. Los resultados mostraron que solo cuatro de ellas tuvieron una sobrevivencia del 100% (todas suculentas, entre nativas y exóticas), otras cinco especies mostraron valores de entre 26 y 44%, mientras que las seis restantes no sobrevivieron el periodo de estudio bajo las condiciones experimentales. Este trabajo concluye que es posible encontrar especies que sobrevivan tan solo bajo las condiciones climáticas de determinada región.

II. 9. Fluorescencia de la Clorofila

La determinación de fluorescencia de hojas intactas ha resultado ser un método efectivo para evaluar el estado fisiológico de plantas, en particular de los procesos fotosintéticos (Krause et al., 1991). El análisis de la fluorescencia de la clorofila se basa en un principio relativamente sencillo: la energía lumínica absorbida por las moléculas de clorofila tiene uno de tres destinos: ya sea su aprovechamiento en las reacciones fotoquímicas (fotosíntesis), o puede ser disipada en forma de calor, o reemitida como luz (fluorescencia), la cual presenta una longitud de onda más grande que la absorbida. Estos tres procesos compiten entre sí, por lo que se entiende que

el aumento en la eficiencia de uno se traduce en la disminución de los otros. Así, midiendo la fluorescencia de la clorofila del fotosistema II (PSII), se puede obtener información acerca de cambios en la eficiencia de las reacciones fotoquímicas. La fluorescencia puede ser cuantificada exponiendo una hoja a luz de determinada longitud de onda y midiendo la cantidad de luz re-emitida a mayor longitud de onda (Maxwell et al., 2000).

La emisión de fluorescencia está estrechamente relacionada con la actividad del fotosistema II, pues es el primero en canalizar la energía de excitación provocada por los fotones solares en el aparato fotosintético (Oxborough, 2004). Los cambios en el estado de la fluorescencia se explican mediante lo que se conoce como el “efecto Kautsky”, que lleva el nombre de quien describió tales procesos. Maxwell y Johnson (2000) lo explican de la siguiente manera: se descubrió que al transferir material fotosintético de oscuridad a luz ocurría un incremento en la emisión de fluorescencia en un periodo de tiempo de alrededor de un segundo; este aumento ocurre como consecuencia de la reducción de los aceptores de electrones (específicamente la plastoquinona Q_A) en el camino del PSII. Una vez que el PSII absorbe luz y Q_A ha aceptado un electrón, no es capaz de aceptar otro hasta que haya pasado el que ya tiene al siguiente aceptor (Q_B). Durante este último paso se dice que el centro de reacción está “cerrado”. En cualquier momento, la presencia de centros de reacción cerrados conlleva a una reducción general de la eficiencia fotoquímica y por consecuencia se incrementa la emisión de fluorescencia.

Uno de los parámetros comúnmente utilizados, por su facilidad de muestreo, para interpretar el estado fisiológico del PSII es el denominado “máxima eficiencia cuántica del PSII” (o la eficiencia cuántica si todos los centros de reacción del PSII estuvieran abiertos). Este es calculado como el cociente de la fluorescencia variable (F_v) sobre la fluorescencia máxima (F_m) de una muestra (F_v/F_m).

Debe tenerse en cuenta que para determinar las diferentes variables de este parámetro es necesario que la muestra (la hoja o sección de ella) esté "adaptada a la oscuridad". Este último es un concepto muy usado en la literatura sobre señales de fluorescencia de la clorofila, y se refiere a que no debe incidir luz de ningún tipo sobre la muestra previo a la cuantificación de fluorescencia; tal hecho se justifica mediante la definición de las variables F_v y F_m .

La fluorescencia variable (F_v) se calcula como: $F_v = F_m - F_o$. Donde F_o es la fluorescencia mínima o de origen, lo cual corresponde al estado en el que los centros de reacción en el PSII se encuentran “abiertos”. Aquí entra la importancia de la oscuridad de la hoja, pues al no incidir luz sobre los fotosistemas, no hay energía que provoque el transporte de electrones entre los aceptores del PSII, entonces se entiende que son capaces de aceptar electrones en caso de incidir luz (aquí se entiende que los aceptores están oxidados); este estado relajado del fotosistema provoca una baja emisión de fluorescencia. Debe tenerse en cuenta que F_v no es un componente independiente de fluorescencia y el valor solo describe el cambio de emisión de esta entre dos estados definidos (Krause et al., 1991; Maxwell et al., 2000).

La fluorescencia máxima total (F_m), se interpreta como el estado en el que no existe lo que se conoce como “temple fotoquímico”, es decir, el estado de la fluorescencia cuando no hay reacciones fotoquímicas que compitan con ella, por lo cual también se entiende que los centros de reacción están cerrados (Krause et al., 1991; Maxwell et al., 2000). En la hoja adaptada a la oscuridad esto se logra mediante la emisión de un pulso de luz saturante sobre la muestra y midiendo la emisión de fluorescencia cuando esto ocurre. Mientras los centros de reacción permanecían abiertos y relajados sin luz, la consiguiente exposición a luz de alta intensidad por un periodo de microsegundos provoca que los electrones vuelvan a fluir por los aceptores del PSII, por lo tanto los centros de reacción se “cierran” (estado reducido de los aceptores), y como se ha dicho, la presencia de centros de reacción cerrados conlleva a la emisión de fluorescencia.

La relación F_v/F_m nos da entonces un valor que representa la capacidad máxima del PSII de aprovechar los fotones en reacciones fotoquímicas (o sea, la máxima eficiencia del PSII) (Oxborough, 2004). Bajo diferentes condiciones se ha encontrado que sus valores se dan en un rango de 0.83 y 0.04 entre hojas de diferentes especies y ecotipos. En condiciones no estresantes el valor de F_v/F_m es muy cercano al óptimo (0.83), bajo condiciones ambientales estresantes la eficiencia del PSII disminuye, y esto se refleja en un decremento de F_v/F_m , que puede ser cercano a 0.0 dependiendo de la magnitud de estrés (Krause et al., 1991).

II. 9. I Estrés fisiológico determinado por medio de Fv/Fm

Existen investigaciones donde se relaciona la variación de Fv/Fm bajo condiciones variables de luz, temperatura y disponibilidad de agua.

Woo et al. (2008) definieron una metodología en la cual se determinó una caída del valor de Fv/Fm en diferentes mutantes y ecotipos de *Arabidopsis thaliana* bajo condiciones de estrés hídrico solamente. Probando solo ecotipos, se dieron cuenta de que una disminución del Contenido Relativo de Agua (RWC por sus siglas en inglés) de las plantas de entre 10 y 20% correspondió a una depresión del valor Fv/Fm de entre 0.45 y 0.75, mientras que con RWC de 80 a 90%, Fv/Fm se mantuvo en niveles óptimos (~0.80 aproximadamente). También observaron que las plantas en condiciones de sequía y con Fv/Fm menor al 33% del valor promedio en plantas sin estrés (es decir, plantas con valores Fv/Fm óptimos), no se recuperaron después de haber sido rehidratadas, mientras que sí lo hicieron aquellas con valores mayores a los del umbral (33%), junto con el aumento gradual de Fv/Fm.

Otro trabajo enfocado a la variación de Fv/Fm fue el de Curtis et al. (2014), en el cual se muestran las respuestas de este parámetro bajo condiciones de temperatura alta en 41 especies desérticas australianas. Utilizando solo las hojas bajo diferentes tratamientos de temperatura por 15 minutos (46, 48, 50, 52, 54° C y 28° C para el control). En este estudio se determinó, para cada especie, el valor de temperatura en el cual Fv/Fm disminuía un 50% (T_{50}) con respecto a los valores de las hojas antes del estrés. Tal valor estuvo entre los 48.2 y 54.3° C entre las especies. También midieron la recuperación de la actividad cuántica del PSII después del estrés por calor utilizando diferentes señales de fluorescencia, incluyendo Fv/Fm. En general, para los tratamientos de <50° C las plantas mostraron una recuperación casi total de las funciones del PSII, mientras que bajo los tratamientos de temperatura más alta (52 y 54° C) mostraron poca recuperación, indicando un serio daño al sistema fotosintético. A esto debe agregarse que la recuperación varió entre especies y según el tratamiento, siendo las menos afectadas por un determinado tratamiento las que mostraron una recuperación mayor. También se observó que la mejora de la eficiencia del PSII fue generalmente mayor en especies que mantuvieron un valor alto de Fv/Fm después del estrés. Se aclara que un umbral de tolerancia (T_{50}) alto no necesariamente significó la capacidad de una buena recuperación; así concluyeron que incluso

si una especie soporta temperaturas mayores a 50° C, no siempre significa que tenga la capacidad de una completa recuperación del PSII al estado pre-estresado. Sus resultados demuestran también que incluso una exposición transitoria a altas temperaturas puede disminuir la tasa de recuperación del PSII debido a daños irreversibles de fotoinhibición.

La fotoinhibición se entiende como un declive reversible en la actividad fotosintética de una planta, provocado por una exposición a luz mayor a la necesaria para la fijación de carbono (Guidi y Degl'Innocenti, 2012), y F_v/F_m es muy utilizado para medir el nivel de fotoinhibición de las plantas (Favaretto et al., 2011)

Parte del trabajo de Favaretto et al. (2011) fue analizar la variación del parámetro F_v/F_m y el contenido de pigmentos fotosintéticos en ocho especies de árboles tropicales, cuatro de ellas pioneras (especies que se supone que están adaptadas a exposición solar completa, tienen mayor resistencia a la fotoinhibición y presentan mayor tasa fotosintética), y las restantes de sucesión tardía (adaptadas a la sombra y más susceptibles a fotoinhibición). Todas las especies estuvieron bajo dos exposiciones de luz: al 100% de radiación solar (tratamiento de luz) y 10% de radiación (tratamiento de sombra). Los resultados mostraron que las especies pioneras creciendo bajo luz tuvieron valores de F_v/F_m 11% más bajos que las crecidas bajo sombra. Por su parte, las de sucesión tardía presentaron valores 19% más bajos en luz que en sombra, mostrando una especie valores tan bajos como $F_v/F_m = 0.53$. En cuanto a la concentración total de clorofila ($Cl\ a + b$), encontraron un decremento de 22% en pioneras y de 55% en las tardías bajo 100% de radiación, en comparación con las sombreadas. En general se observó que las pioneras fueron menos sensibles a la exposición total que las de sucesión tardía, resultado que los autores esperaban. La forma de vida de las pioneras hace que estos resultados tengan cierta lógica, pues son árboles grandes con doseles sobresalientes de entre las diferentes capas de vegetación, es decir, están más expuestos a la luz solar, y por lo tanto deberían tener respuestas fisiológicas que demuestren tolerancia hacia este factor abiótico. Por otro lado, las de sucesión tardía crecen por debajo del dosel de otros árboles y es de esperarse que, adaptadas a este ambiente lumínico, tengan una menor capacidad fotosintética y la sobreexposición a radiación solar provoque un efecto negativo en su actividad fotoquímica. Los autores también aclaran que estos resultados pueden no siempre seguir esta lógica, pues también encontraron que una especie de sucesión tardía no mostró un declive tan pronunciado de F_v/F_m como las otras de su misma forma de vida bajo exposición solar completa.

II. 10. Contenido de Clorofila

La concentración de clorofila de las hojas es un parámetro importante usado frecuentemente como indicador del desarrollo de cloroplastos, capacidad fotosintética, contenido de nitrógeno en la hoja o estado vital de la planta (Ling et al. 2011). Es un atributo que se utiliza, entre otras cosas, para estudiar la respuesta de las plantas hacia condiciones estresantes, como el déficit de agua (Ramírez et al., 2014), efectos por irradiación (Hoel et al., 1998; Smith et al., 2000; Favaretto et al., 2011), entre otros.

Actualmente se tiene como alternativa para cuantificar el contenido de clorofila en plantas el uso de medidores portátiles, los cuales permiten obtener un valor relativo del contenido de clorofila de muestras *in vivo*. Tales dispositivos aprovechan las propiedades ópticas de las hojas, de manera que estos métodos se basan en el cálculo de la absorbancia y/o transmitancia de radiación a determinada longitud de onda por parte de la clorofila (Uddling et al. 2007).

Estos dispositivos presentan algunas ventajas con respecto a los métodos químicos en los que se utilizan solventes para determinar la concentración de clorofila en muestras. Las mediciones se pueden realizar en hojas vivas, no es un método destructivo, se obtiene un valor en poco tiempo y de manera sencilla y se pueden realizar muchas mediciones en un ciclo de crecimiento entero (Limantara et al., 2015).

Se presentan también algunas desventajas. Principalmente se debe tener en cuenta que es un valor relativo del contenido de clorofila y no se puede interpretar como concentración por área de la muestra, además, el valor no es tan preciso como la determinación por extracción con solventes y cromatografía. Se presenta también una limitante en cuanto a las características de las hojas, pues existen medidores que no permiten el muestreo de hojas muy gruesas, pequeñas, y/o pálidas (Limantara et al., 2015).

El valor determinado por los dispositivos es relativo a la concentración real de clorofila y en algunos experimentos se ha demostrado que ambos valores tienen una fuerte correlación. Limantara et al. (2015) compararon los valores obtenidos de un dispositivo portátil (SPAD-502 chlorophyll meter, cuya unidad de medición se denomina “SPAD”), con los valores de concentración de clorofila determinados por medio de cromatografía líquida de alta resolución,

en 10 especies vegetales comestibles. Los resultados de regresión lineal dieron un valor de mejor ajuste (r^2) entre ambas variables de 0.74, lo que se interpreta por los autores como una relación lineal positiva y moderada entre la cantidad de clorofila *a* y *b* obtenida por ambos métodos. Una relación más fuerte ($r^2 = 0.98$) se observó entre los valores SPAD de clorofila y los valores de porcentaje de nitrógeno obtenidos con otro dispositivo portátil de funcionamiento similar (Agriexpert CCN 6000). En otro estudio de objetivos similares, y utilizando el mismo medidor portátil, realizado por Uddling et al (2007), se encontró una relación exponencial fuerte (valores de r^2 mayores a 0.80) entre los valores SPAD y concentración de clorofila por área y peso fresco en dos especies: abedul (*Betula pendula*) y trigo (*Triticum aestivum* cv. Dragon y Lantvete). Ling et al. (2011) encontraron resultados muy similares en cuanto a la especie *Arabidopsis thaliana* con objetivos y metodologías similares a los trabajos antes citados.

Es importante aclarar, que el medidor portátil de clorofila usado en los experimentos antes mencionados, calcula su índice de contenido relativo de clorofila (SPAD) por medio de la determinación de la transmitancia de la radiación a 650 y 940 nanómetros (banda roja e infrarroja del espectro electromagnético, respectivamente), a través de la hoja (Minolta, 1989 citado por Uddling, 2007); además, la concentración de pigmento se sustenta en lo estipulado por la Ley de Beer (Uddling et al, 2007).

Los trabajos anteriores demuestran qué tan confiables pueden ser los valores relativos de contenido de clorofila determinados por medidores portátiles *in situ*. La ventaja de ser un método no destructivo se enfatiza cuando en un experimento se desea monitorear las variaciones de contenido de clorofila en el mismo individuo en un periodo de tiempo, bajo condiciones cambiantes o a través de su desarrollo, en cuyo caso la destrucción o daño a la planta no es posible (Ling et al., 2011).

II. 11. Características Florísticas y Climáticas de Hermosillo, Sonora

En términos biológicos y ecológicos, la ciudad de Hermosillo, Sonora, México, se ubica dentro de la región del Desierto Sonorense, uno de los cuatro desiertos más extensos de Norteamérica, específicamente dentro de una de las seis subdivisiones descritas por Forrest Shreve (Shreve y

Wiggins, 1964) para esta región, conocida como Planicies de Sonora (Plains of Sonora), que a su vez se encuentra dentro de la comunidad biótica definida como Matorral Desértico (Dimmit, 2000) (figura 2).

En Hermosillo se distingue un clima cálido y seco en la mayor parte del año, con lluvias en verano e invierno. Registros promedio de 30 años (1981 al 2010) del Servicio Meteorológico Nacional para esta zona, indican que son los meses de junio, julio y agosto en los que se alcanzan las temperaturas más altas (entre 38° y 39° C según las medias de temperatura máxima para esos meses). Como dato extra se recalca que el día 3 de junio del 2014 se registró un récord histórico de una temperatura máxima de 49.5° C. Las temperaturas más bajas rondan los 6° C durante los meses de diciembre a enero (según las medias de temperatura mínima para esos meses). Se presentan dos estaciones de lluvia, siendo agosto el mes con el valor más alto de precipitación máxima (256.9 mm), seguido de diciembre (155 mm); la precipitación media anual es de alrededor de 320.8 mm, siendo el verano la estación más lluviosa, seguido del invierno con valores más bajos de precipitación (Servicio Meteorológico Nacional, 2010) e incluso podría no presentarse en este periodo, como ha pasado en algunos años.



Figura 2. Ubicación de la ciudad de Hermosillo, Sonora en un mapa que destaca las comunidades bióticas alrededor del Desierto Sonorense (Fuente: Dimmit, 2000).

II. 11. 1. Generalidades sobre la vegetación de las Planicies de Sonora del Desierto Sonorense

Las Planicies de Sonora, una subdivisión del Desierto Sonorense, comprende una pequeña región central del estado de Sonora que consta de valles abiertos con vegetación densa, donde abundan los árboles de leguminosas, como los mezquites (*Prosopis* spp.), además de algunos cactus columnares; las pocas colinas de esta área representan islas de matorral espinoso (Dimmit, 2000).

Las especies más abundantes de árboles en las Planicies de Sonora son *Olneya tesota* (palo fierro), *Parkinsonia microphylla* (palo verde) y *Prosopis juliflora* var. *velutina* (mezquite). El arbusto dominante es *Encelia farinosa* (rama blanca), distribuida en la zona norte de la subdivisión, donde también abundan *Parkinsonia sonora* (palo verde) y *Fouquieria macdougalii* (ocotillo macho). También abundan los cactus *Stenocereus thurberi* (pitahaya) y *Lophocereus schottii* (sinita) (Shreve y Wiggins, 1964).

Las especies representativas de las Planicies de Sonora pertenecen a su vez a algunas de las familias taxonómicas más comunes del Desierto Sonorense. Los mezquites, palo verdes y el palo fierro pertenecen a la familia Fabaceae, plantas tolerantes a la sequía y abundantes en los trópicos áridos. La pitahaya y la sinita son de la familia Cactaceae, la cual se reconoce por sus especies espinosas de tejidos suculentos, algunas columnares de varios metros de altura, además de presentar flores de gran tamaño, distintivas del grupo. La rama blanca es una especie perteneciente a la familia Asteraceae, o familia de los girasoles, la cual tiene más de 20,000 especies ocupando casi todos los hábitats del mundo, incluyendo los desiertos; se caracterizan por ser predominantemente herbáceas y por sus inflorescencias rodeadas de brácteas. Los ocotillos pertenecen a una pequeña familia de 13 especies, Fouquieriaceae, que se restringe a la sección árida de Norteamérica, y se caracterizan por sus tallos largos espinosos y con hojas estacionales (Dimmit, 2000).

Algunas especies de las familias más comunes del Desierto Sonorense son usadas de manera ornamental o tienen algún tipo de uso. Los cactus representan, entre otras cosas, una atracción turística, pues las especies columnares, como la pitahaya, la sinita, el sahuaro (*Carnegiea gigantea*) y el cardón (*Pachycereus pringlei*) son plantas muy vistosas porque llegan a medir varios metros de altura, además de producir flores de gran tamaño; por lo menos en el lado estadounidense del Desierto Sonorense existen viveros especializados en la producción de cactáceas de esta región (Dimmit, 2000). Los cactus han cobrado popularidad no solo por sus peculiares formas de vida, también por su resistencia a las condiciones climáticas de esta región. De los ocotillos, la especie *Fouquieria splendens* (ocotillo) es utilizada para hacer cercos vivos, que consiste en cortar tallos de la planta y plantarlos en hilera, los cuales rebrotan debido a que enraízan de manera rápida; también son utilizados de forma ornamental en jardines y sus flores son especializadas en atraer colibríes y otros polinizadores (Turner et al., 1995). En cuanto a los árboles antes mencionados, los mezquites y palo verdes se plantan ornamentalmente en varios

sitios de la zona urbana de Hermosillo, como áreas habitacionales, de recreación o empresariales, camellones y escuelas; por su resistencia a la sequía son plantas que no requieren de muchos cuidados, aunque tienen desventajas pues algunas presentan espinas abundantes, lo cual podría ser un problema para las personas. Sobre la familia Asteraceae, dentro del Desierto Sonorense se atribuye gran importancia especialmente a algunos géneros, como *Ambrosia*, cuyas especies son importantes en la recuperación de vegetación nativa en sitios que han sido perturbados, ya que son de las pocas especies que colonizan suelos totalmente expuestos. Además, son plantas nodriza que ayudan en el establecimiento de otras especies; por esa razón son producidas muchas de estas plantas en viveros, con el propósito de recuperar vegetación nativa de sitios perturbados. Otra especie que rápidamente coloniza sitios perturbados es la rama blanca (Dimmit, 2000), la cual también se ha utilizado de manera ornamental en ciudades desérticas (Duffield y Jones, 1981 citado por Turner et al., 1995).

III. JUSTIFICACIÓN

La implementación de sistemas de naturación se hace con el propósito de crear mejores condiciones ambientales dentro de las ciudades, lo cual puede afectar positivamente en la vida de sus pobladores; esto se logra mediante el aprovechamiento de los servicios ambientales que una cubierta vegetal es capaz de brindar, lo cual ha sido demostrado gracias a la investigación formal que se ha realizado respecto al tema, principalmente en ciudades de clima templado. Por lo anterior es importante explorar la posibilidad de implementación de sistemas de naturación en ciudades con climas diferentes al templado, como en el caso de la ciudad de Hermosillo, Sonora, donde se presentan condiciones extremas de temperatura durante los meses de verano. Además, es importante aclarar que hasta la fecha solo se ha encontrado un registro de trabajo de investigación referente al tema y enfocado a la ciudad de Hermosillo, Sonora.

IV. HIPÓTESIS CIENTÍFICA

Considerando los criterios de selección de plantas y sustratos para techos verdes, se espera que los modelos experimentales sean funcionales en el clima de Hermosillo. Es decir, que las plantas seleccionadas sean resistentes al estrés y que se produzca un efecto refrescante bajo el modelo de techo verde.

V. OBJETIVOS

V. 1. Objetivo General

Implementar modelos experimentales de techo verde para determinar su efecto en términos de microclima bajo el mismo y la viabilidad y desempeño de una selección de plantas y sustratos.

V. 2. Objetivos Específicos

1. Aplicar algunas técnicas para propagar las especies a probar y determinar su viabilidad.
2. Determinar la viabilidad de dos medios de crecimiento con diferente capacidad de retención de agua.
3. Determinar el desempeño de una selección de especies de plantas en la capa de sustrato midiendo variables fisiológicas que indiquen estrés, como la concentración de clorofila y la fluorescencia de la clorofila.
4. Determinar los efectos térmicos que la capa de sustrato y plantas generan.
5. Realizar fichas descriptivas de las especies.

VI. METODOLOGÍA

Exceptuando las salidas de campo, la ejecución de este estudio se realizó en las instalaciones del laboratorio de ecología molecular y funcional y en el área de sombreadero de la Estación Regional Noroeste (ERNO), del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), ubicada en Hermosillo, Sonora, durante la estación de verano del año 2015.

Todas las gráficas y análisis estadísticos se realizaron con el paquete SigmaPlot versión 11.0 para Windows (Systat Software, Inc.).

VI. 1. Selección de Plantas

Las plantas que se probaron en este trabajo se enlistan en la tabla IV. Las cuatro especies seleccionadas tienen la característica común de ser típicamente usadas de manera ornamental, ya sea sembradas en macetas o suelo directo en patios de casas y camellones y todas crecen expuestas totalmente al sol. Además, es fácil encontrarlas en viveros locales, con excepción de *E. farinosa*.

Las especies se seleccionaron de acuerdo a varios criterios que la literatura define sobre la selección de plantas para techos verdes y se resumen en la Tabla V.

Tabla IV. Especies probadas en los modelos experimentales de techo verde; también se incluye información sobre la familia taxonómica a la que pertenecen, forma de crecimiento y su origen geográfico.

Espece	Nombre común	Familia	Forma de crecimiento	Origen
<i>Agave desmettiana</i> Jacobi	Agave blando	Asparagaceae	Roseta suculenta	Posiblemente este tropical de México
<i>Carissa macrocarpa</i> Ecklon	Carisa	Apocynaceae	Arbustiva	Sur de África
<i>Encelia farinosa</i> Gray	Ramablanca	Asteraceae	Arbustiva	Noroeste de México
<i>Portulacaria afra</i> Jacq.	Árbol de la abundancia	Didiereaceae	Suculenta arbustiva	Sur de África

Tabla V. Especies de plantas y criterios que justifican su uso en techos verdes

Espece	Criterio de seleccin
<i>Agave desmettiana</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Metabolismo CAM - Suculencia de tejidos - Uso ornamental comn en la ciudad de Hermosillo - Sistema radicular somero - Perenne
<i>Carissa macrocarpa</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Uso ornamental comn en la ciudad de Hermosillo - Buena cobertura (muy frondosa) - Perenne
<i>Encelia farinosa</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Nativa a la zona de estudio - Usada ornamentalmente - Perenne
<i>Portulacaria afra</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Metabolismo CAM - Suculencia de tejidos - Uso ornamental comn en la ciudad de Hermosillo - Perenne

VI. 2. Propagacin y Obtencin de Individuos

Se prob la propagacin por semillas de *E. farinosa* y *C. macrocarpa*, ya que se encontraron individuos con frutos y semillas disponibles de ambas especies. Para el caso de *E. farinosa* se colectaron aquenios maduros de un sitio ubicado dentro del rea del Centro Ecolgico del Estado de Sonora (CEES), en el que se registr la presencia de individuos en estado de floracin; se

colectaron suficientes semillas para las pruebas de germinación y se probaron tratamientos diferentes, ya que se ha reportado que la especie tiene un porcentaje de germinación bajo, de 2 a 5 % (Emery 1988 citado por Padget et al., 1999). Las semillas de cada tratamiento se colocaron en cajas Petri con papel absorbente húmedo dentro de una cámara de germinación con luz y a 25° C, a menos que el tratamiento indicara otra cosa.

Se realizó una prueba de viabilidad con una muestra de 183 semillas de *E. farinosa*, las cuales fueron minuciosamente seleccionadas con el objetivo de obtener solo aquellas que a simple vista parecieran viables; se mantuvieron sumergidas en agua destilada por 48 horas, se abrió la testa de cada una, se determinó el número de semillas vacías y con endospermo. Los endospermos, una vez separados de la testa, se sumergieron en una solución de cloruro de tetrazolio (cloruro de 2, 3, 5 – trifeniltetrazolio) al 0.5%, se mantuvieron dentro de un cuarto completamente oscuro por dos horas, posteriormente se clasificaron las semillas según sus características de tinción.

Un tratamiento en especial para las semillas de *E. farinosa* se describirá en esta sección, pues con los tratamientos iniciales no se logró un gran porcentaje de germinación. El propósito de tal experimento fue observar si de alguna manera se induce la germinación de semillas dejadas cierto tiempo bajo condiciones naturales. En el laboratorio se prepararon seis bolsas pequeñas de tela tipo tul, dentro de cada una se colocaron 50 semillas. En el mismo sitio del CEES antes mencionado se marcaron con cinta de color dos plantas de *E. farinosa* separadas entre sí por 5 metros aproximadamente, cerca de cada una (alrededor de 30 cm de distancia) se enterraron tres bolsas unidas entre sí, pero no sobrepuestas, por medio de un clavo, con el cual se aseguró que las bolsas se quedaran en ese punto de entierro. La profundidad fue de 5 cm aproximadamente. El día de entierro fue el 7 de abril del 2015, y se fue recuperando una bolsa a la vez a diferentes tiempos después del primer día del experimento (especificados en la sección de resultados); una vez recuperadas se llevaron al laboratorio, donde las semillas se separaron del exceso de tierra, se contaron y se colocaron en cajas Petri con papel absorbente que se mantuvo siempre húmedo, a temperatura ambiente del laboratorio y bajo luz poco intensa; diariamente se checkaron las cajas y se registraron todos los germinados.

Para *C. macrocarpa* se colectaron frutos de plantas presentes en áreas habitacionales, donde es muy común. Se extrajo una muestra suficiente de semillas y se dejaron secar a temperatura ambiente sobre hojas de papel. Una muestra de 200 semillas fue sumergida por 24

horas en agua destilada, posteriormente se repartieron equitativamente en cuatro cajas Petri con papel absorbente, las cuales se mantuvieron dentro de una cámara de germinación con luz a 25° C y se revisaron periódicamente.

Para *P. afra*, a falta de frutos y semillas, se probó la propagación por estacas. Para esto se preparó una mezcla de sustrato que consistió en dos partes de arena y una de turba de *Sphagnum* que se vertió en bolsas individuales de plástico para planta. Posteriormente se cortaron 30 tallos, de 5 a 15 cm de largo, de individuos grandes establecidos en macetas, se eliminaron las hojas más cercanas al extremo de corte y se pusieron en contacto con enraizador en polvo (FAX raizone-plus), después se enterraron aproximadamente a tres centímetros de profundidad en el sustrato húmedo. Cada estaca se colocó individualmente en una bolsa, se cubrieron con bocas de botellas de plástico con el fin de conservar la humedad del aire circundante, se mantuvieron bajo condiciones de sombreadero y se aplicó riego cada dos días. Se dejaron pasar dos semanas desde iniciado el experimento, para corroborar el enraizado en estacas seleccionadas al azar.

En el caso de *A. desmettiana* tampoco se contó con semillas, pero es una especie que se reproduce fácilmente de manera vegetativa; por lo tanto se colectó una muestra de 30 hijuelos de diferentes plantas madre haciendo recorridos por camellones y colonias de la ciudad. Los ejemplares se desprendieron con cuidado y tratando de conservar las raíces; se transplantaron a macetas con la misma mezcla de sustrato utilizada para *P. afra* y se mantuvieron bajo condiciones de sombreadero aplicando riego cada dos días. Una segunda prueba de propagación consistió en la colecta de una muestra de 30 hijuelos desarrollados sobre las inflorescencias de un agave de la misma especie, los cuales se mantuvieron por 24 horas en cajas Petri con agua, procurando que la base de las plantas se mantuviera húmeda. Finalmente, se les aplicó enraizador en la base, se sembraron en macetas individuales con sustrato comercial de vivero local y se mantuvieron con riego constante dentro del sombreadero.

Para los siguientes experimentos que involucraron el uso de plantas de mayor talla a las obtenidas de semillas o estacas pequeñas, se obtuvieron de diferentes fuentes los individuos necesarios. *C. macrocarpa* y *P. afra* se adquirieron de viveros locales, *E. farinosa* se colectó del mismo sitio de donde se recolectaron sus semillas y de *A. desmettiana* se aprovecharon los hijuelos transplantados obtenidos previamente en el experimento de propagación.

VI. 3. Conformación de Sustratos

Se conformaron cuatro mezclas de diferentes componentes para los sustratos de prueba. Los elementos (o componentes) de las mezclas se seleccionaron siguiendo criterios de disponibilidad en tiendas locales, también según su uso en otras investigaciones referentes a este tema y su uso en producción de plantas. Finalmente se utilizó: arena, turba de *Sphagnum* (peat moss), vermiculita, tierra lama y tezontle chico (piedra volcánica). Se descartó el uso de mezclas prefabricadas con tal tener un mayor control sobre las proporciones de componentes y sus características físicas.

Previo a la conformación de las mezclas para utilizar como medio de crecimiento (sustratos), a los componentes se les determinaron las características físicas de densidad real (DR), densidad aparente (DA), porosidad (P) y capacidad de retención de agua (CRA), siguiendo los métodos propuestos por García (1981), con 10 repeticiones. Posteriormente a las mezclas desarrolladas también se les determinaron tales propiedades con el mismo método.

A partir del análisis unilateral de varianza de Kruskal–Wallis se determinó si existieron diferencias significativas de las características físicas entre mezclas ($\alpha = 0.05$), posteriormente, por medio de pruebas Tukey ($\alpha = 0.05$) se determinaron diferencias entre todos los pares posibles.

El sustrato uno (S1) y el dos (S2) difirieron en un solo componente, con el cual se controló la capacidad de retención de agua, siendo la vermiculita uno de los elementos que más retuvo agua, el cual se incluyó en S1, mientras que a S2 se le agregó tezontle, uno de los componentes que tuvo baja CRA. La mezcla 4 (S4) tuvo los mismos componentes que la 1, pero con proporciones diferentes, mientras la 3 (S3) fue la de menos componentes añadidos (tabla VI).

Uno de los objetivos de este trabajo fue experimentar con dos medios de crecimiento con diferente capacidad de retención de agua, por lo tanto, S1 y S2 fueron los seleccionados para los experimentos posteriores, pues difirieron significativamente en esta propiedad (ver sección de resultados). Las propiedades de las otras mezclas ayudaron a explicar cómo se puede controlar la CRA cuando los componentes y sus proporciones varían.

Tabla VI. Mezclas desarrolladas y la proporción de sus componentes.

Mezcla 1 (S1)		Mezcla 2 (S2)	
Turba de <i>Sphagnum</i>	25%	Turba de <i>Sphagnum</i>	25%
Tierra lama	25%	Tierra lama	25%
Arena	25%	Arena	25%
Vermiculita	25%	Tezontle	25%
Mezcla 3 (S3)		Mezcla 4 (S4)	
Turba de <i>Sphagnum</i>	20%	Turba de <i>Sphagnum</i>	20%
Tierra lama	40%	Tierra lama	35%
Arena	40%	Arena	35%
		Vermiculita	15%

VI. 4. Variación de Humedad en Mezclas de Sustrato

Previo a la instalación de los modelos experimentales de techo verde se determinó la variación y diferencia de la relación de agua entre las mezclas S1 y S2, por lo que se tomaron datos del porcentaje de humedad volumétrica (% de θ_v) en el tiempo. Esto se logró mediante un experimento con tres macetas por mezcla, con volumen definido y constante cada una, teniendo en total 6. A una maceta por mezcla se le colocó un sensor automático de humedad (TMS-3 TOMST datalogger; TOMST Ltd.) programado para registrar mediciones de % de θ_v cada 10 minutos. También se tomaron muestras puntuales con un medidor portátil (HH2 Moisture Meter unido a un sensor ThetaProbe tipo ML2x; Delta-T Devices Ltd versión 3.0) una vez al día, entre las 10 a.m. y 2 p.m., a cada una de las macetas. Para iniciar el experimento se aprovechó una lluvia nocturna de 49.8 mm, que cayó la noche del 25 de Junio, con la cual se saturaron de agua las macetas con sustrato, previamente puestas sobre una mesa a la intemperie y a exposición solar total. La primera medición se tomó a las 11 a.m. el 26 de Junio y se prosiguió hasta que se llegara a un porcentaje de humedad que se consideró mínimo.

Con los datos de humedad del HH2 convertidos a arcoseno se determinaron las rectas de mejor ajuste, mediante el análisis de regresión lineal simple entre el tiempo de medición (horas transcurridas desde el inicio del experimento) y el % de θ_v para cada sustrato. Una vez obtenidas las pendientes se determinó el intervalo de confianza del 95% para cada una. Entonces, se consideró que si ambos intervalos se traslapaban, se podría afirmar que, en determinado punto en el tiempo, las humedades de los sustratos coincidieron en sus valores. Para determinar diferencias significativas de la humedad entre ambos sustratos se realizaron pruebas t ($\alpha = 0.05$) por cada par de puntos del mismo tiempo de medición. Se aclara que cada punto de medición representa un promedio de tres repeticiones.

VI. 5. Evaluación de Plantas en Diferentes Sustratos: Experimento en Macetas

Se hizo una prueba preliminar de las plantas en ambos sustratos para determinar la relación entre parámetros fisiológicos y la humedad del medio de crecimiento, además de detectar aspectos físicos (como marchitamiento y/o caída de hojas) que indicaran estrés. Se prepararon 6 macetas por especie, es decir, 24 en total por las cuatro especies, cada una con un solo individuo, la mitad de ellas con S1 y la otra con S2. Para observar efectos de las mezclas seleccionadas se eliminó la mayor parte del sustrato original de las raíces de las plantas al momento de trasplantarlas, solo se dejó poco de este unido al sistema radicular para evitar un estrés mayor en el proceso de aclimatación a un nuevo medio de crecimiento. Se dejaron aclimatar dos semanas bajo sombra y aplicando riego cada dos días. Después, con el sustrato saturado de agua (después de riego), se colocaron sobre una mesa a exposición solar total y se inició con muestreos periódicos. Se determinó la eficiencia cuántica máxima del fotosistema II (F_v/F_m), utilizando un fluorímetro portátil (Pocket PEA; Hansatech Instruments Ltd. Versión 1.0). También se determinó un índice de contenido de clorofila (ICC) mediante el uso de un medidor portátil de clorofila (CCM-200 plus; Opti-Sciences Inc.), el cual calcula el ICC a partir del cociente del porcentaje de transmitancia a 930 nm sobre el porcentaje de transmitancia a 653 nm, de una sección de hoja viva. Al mismo tiempo se midió la humedad de sustrato en cada una de las macetas con el HH2. Se seleccionaron al azar 2 plantas por especie y mezcla, de cada una se seleccionó una hoja al

azar a la cual se le midió F_v/F_m , mientras que a otra hoja de la misma planta y con características similares de apariencia, se le determinó el ICC. El número de mediciones varió por día, siendo máximo tres y mínimo una. Las plantas no se regaron durante el experimento, pero hubo días lluviosos en los que la humedad aumentaba.

Se analizaron los datos crudos mediante el coeficiente de correlación de Spearman (r_s), para determinar si existió relación entre la humedad del sustrato y los parámetros fisiológicos. También se comparó la humedad entre los sustratos por especie, por medio de los intervalos de confianza de las respectivas rectas de mejor ajuste, como se especificó anteriormente.

Los valores máximos y mínimos del % de θ_v entre sustratos por especie se analizaron mediante pruebas t ($\alpha=0.05$), con el fin de detectar diferencias significativas. Cada valor correspondiente estuvo representado por una media de tres repeticiones.

VI. 6. Modelo Experimental de Techo Verde

Se desarrollaron dos modelos experimentales de techo verde; cada uno se diferenció solamente por la mezcla de sustrato. Para fines prácticos se denominará M1 al modelo en el que se usó S1, y M2 en el que se usó S2. Cada modelo se desarrolló utilizando como base una mesa metálica con superficie de malla de acero con refuerzos. Sobre cada una se colocaron 5 módulos. Cada módulo consistió en una caja de PVC con una capa de 15 cm de una de las dos mezclas de sustrato (S1 o S2) y en el cual se transplantaron, a lo largo, dos plantas de cada especie, acomodadas en pares; estando en la orilla un par de agaves, seguido de un par de rama blancas, enseguida un par de carisas y finalmente un par de árboles de la abundancia. Las dimensiones de las mesas fueron: 2 m de largo, 0.92 m de ancho y 0.80 m de alto. Las dimensiones de las cajas fueron: 0.73 m de largo por 0.42 m de ancho y 0.35 m de alto. Previo a la instalación se hicieron orificios para el drenaje de agua en las bases de las cajas; dentro de cada una se colocó una capa doble de pellón para cubrir la totalidad del fondo, esto con el propósito de evitar la pérdida de sustrato por los orificios al momento de estar drenando el exceso de agua, ya sea por riego o por lluvia.

Bajo la superficie de las mesas se instaló una charola de metal extendida al área total de la mesa con tres orificios en un extremo, a los cuales se les conectaron mangueras de plástico que descargaron en contenedores de plástico de cinco litros, esto con el propósito de recolectar el agua drenada proveniente de los módulos.

La totalidad del espacio bajo los módulos (entre la placa de unicel colocada sobre el suelo y la superficie de la mesa) fue aislado del medio externo con placas de unicel cortadas a la medida y pegadas a las patas y orillas de las mesas. Esto se hizo con el propósito de determinar si la cubierta ajardinada provoca un efecto térmico en el espacio debajo del cual se instala. Así se simuló el espacio bajo la mesa como el interior de un inmueble y los módulos como el techo verde. Para este objetivo también se forró totalmente con placas de unicel una tercera mesa, de las mismas dimensiones aproximadamente, pero sin cubierta vegetal, que sirvió de control (C) para comparar con los resultados de los dos modelos experimentales.

El muestreo de las variables involucradas en los modelos experimentales se llevó a cabo en el periodo experimental que comprendió del 12 de agosto del 2015 al 22 de septiembre del 2015. En las siguientes secciones se especifica cómo se determinaron: temperatura ambiente (TA), temperatura dentro de los modelos y sobre la cubierta ajardinada, incidencia de radiación fotosintéticamente activa (RFA) y contenido volumétrico de agua en los sustratos.

VI. 6. 1. Mediciones de temperatura dentro de los modelos experimentales

En M1, M2 y C, se instalaron dos registradores térmicos automáticos (HOBO U10-001; Onset Computer Corporation) programados para registrar datos cada media hora durante todo el periodo experimental. Estos dos sensores se colgaron de un cordón dentro del espacio aislado y se ubicaron a distancias iguales entre sí, a una altura media entre el suelo y la superficie de la mesa. Un quinto HOBO con la misma programación se instaló dentro de un protector para sensor de temperatura y se colocó sobre la mesa control; así se obtuvo la temperatura ambiente del área experimental. Se registraron temperaturas durante 40 días: desde el 12 de Agosto al 22 de Septiembre de 2015.

Al ser varios días de muestreo se optó por determinar un promedio de temperatura a cada tiempo de medición, es decir, por cada media hora de registro. La muestra de valores para una determinada hora consistió en todos los valores registrados a esa misma hora durante el periodo experimental (usando los datos de los dos HOBOS correspondientes). La media se calculó para los modelos, el control y la temperatura ambiente. Esto se hizo con el propósito de comparar y observar algún patrón de comportamiento general de la temperatura diaria que haya persistido durante el experimento. Se determinaron diferencias, restando a los promedios horarios de M1 y M2 los de TA y C y así se obtuvo información acerca de la magnitud de diferencias promedio a lo largo del día. Los resultados se presentan en gráficas de líneas y de barras.

VI. 6. 2. Temperatura sobre la cubierta ajardinada

La determinación de la temperatura sobre la capa de sustrato se logró instalando sensores impermeables automáticos (HOBO UA-001-08; Onset Computer Corporation) que pendieron de un cordón a 10 cm sobre el sustrato aproximadamente. Se posicionaron a una distancia media a lo largo y ancho de los módulos. Por su disponibilidad, solo se colocaron dos registradores por modelo experimental, cada uno en un módulo seleccionado al azar y capturando datos cada media hora durante todo el periodo experimental. Estos datos se procesaron y analizaron de la misma forma descrita para la temperatura dentro de los modelos.

Con un termómetro infrarrojo se registró, a una distancia de no más de medio metro, la temperatura en tres puntos equidistantes sobre el dosel de la cubierta vegetal (TS), también se hizo esto en tres puntos separados sobre el techo del laboratorio de ecología molecular y funcional de la ERNO, durante ocho días en los que se determinaron las variables fisiológicas, y a aproximadamente las mismas horas; se determinaron promedios de cada muestreo. Se compararon los valores de los modelos con los del techo por medio de ANOVA de una vía ($\alpha=0.05$), aplicando pruebas Tukey ($\alpha=0.05$) posteriormente, con el fin de determinar si existieron diferencias significativas entre tratamientos a cada tiempo de medición.

Se hicieron análisis de regresión lineal múltiple para evaluar el nivel de correlación de la temperatura sobre el dosel con la humedad del sustrato (registrada a las 8 a. m. y 12 p. m.) y la temperatura ambiente.

VI. 6. 3. Datos fisiológicos y abióticos

Se registraron los valores de F_v/F_m , ICC, % de θ_v y RFA en muestreos realizados tres días a la semana en dos horas diferentes: uno en la mañana (8 a.m. aproximadamente) y otro al mediodía (12 p.m. aproximadamente), durante todo el periodo experimental. Por muestreo se eligió al azar una sola planta por especie en cada módulo (es decir, $n=5$ por especie por modelo experimental), de ellas se seleccionó una hoja al azar para cada variable fisiológica, F_v/F_m e ICC, que se determinaron por medio de los dispositivos antes mencionados; para cada especie se calcularon promedios de las variables bióticas por muestreo. F_v/F_m se representó en gráficas de dispersión, diferenciando entre las mediciones de mañana y mediodía.

Se determinó el porcentaje de humedad volumétrica en los dos sustratos tomando mediciones puntuales con el HH2 en tres puntos equidistantes a lo largo de cada uno de los módulos ($n=15$ por modelo experimental); se calculó una media por modelo experimental a partir de todos los datos obtenidos por muestreo. Se aplicaron pruebas t ($\alpha=0.05$) para determinar diferencias significativas entre promedios de humedad de sustrato en cada muestreo.

Se instaló un ceptómetro (AccuPAR PAR/LAI; Decagon Devices, Inc. Modelo LP-80) sobre la mesa de control antes de iniciar cada muestreo y se programó para capturar valores de radiación fotosintéticamente activa cada 10 minutos durante una hora; finalmente se calculó una media por muestreo. La temperatura ambiente de cada muestreo se obtuvo del HOBO instalado sobre el modelo control.

Inicialmente los datos se analizaron estadísticamente mediante pruebas de correlación lineal múltiple para cada especie en ambos modelos experimentales. Esto se hizo para determinar si existía una relación lineal entre cada variable fisiológica (F_v/F_m e ICC) y las abióticas en conjunto (RFA, % de θ_v y TA). Los resultados mostraron en todos los casos una colinealidad entre las variables independientes RFA y temperatura ambiente, por lo que no fue

posible aceptar los resultados, pues uno de los requisitos del análisis es que no exista correlación entre los regresores. Por lo tanto se determinó el coeficiente de correlación de Pearson entre las variables dependiente (fisiológicas) y cada variable independiente (abióticas). Hubo casos en los que los datos no cumplieron el supuesto de normalidad, para lo cual se determinó el coeficiente de correlación de Spearman (r_s), que es su equivalente no paramétrico.

Por especie en cada modelo se determinó una media total para la mañana y otra para mediodía, para lo cual, se promediaron todos los valores diarios de ICC y Fv/Fm a cada hora de medición. Se determinaron los respectivos coeficientes de variación (C. V). De esta forma se describe la magnitud de variación de los parámetros fisiológicos durante el periodo experimental (por especie en ambos modelos). Estos resultados se presentan en gráficas de dispersión.

Todos los datos de la mañana y los de mediodía se procesaron mediante el análisis unilateral de varianza de Kruskal–Wallis ($\alpha = 0.05$). Esto se hizo para determinar si existieron diferencias significativas de Fv/Fm e ICC entre mañana y mediodía por especie; al detectarlas se hicieron pruebas de Tukey ($\alpha = 0.05$) para comparar todos los pares posibles. También se compararon todos los datos de cada especie entre modelos experimentales, se quiso saber si hubo diferencias significativas entre modelos a cada hora de muestreo. Se descartó el uso de pruebas estadísticas por pares de datos para comparar valores entre mañana y mediodía, porque no se puede asegurar que las hojas, o las plantas, sobre las que se hicieron las mediciones fisiológicas fueron exactamente las mismas en ambas horas de muestreo.

VI. 6. 4. Características físicas de las plantas

Como medida del crecimiento de todas las plantas utilizadas en los modelos experimentales, se determinó la cobertura basal, cobertura de copa y altura cada dos semanas, con ayuda de flexómetros, reglas y calibradores Vernier. Se calcularon las áreas basales y de copa por medio de la fórmula para el área de una elipse; finalmente se promediaron los valores obtenidos por especie en cada modelo. Se reportan los valores iniciales y finales por especie en cada sustrato, los cuales se analizaron mediante pruebas t ($\alpha=0.05$) para determinar diferencias significativas entre sustratos (como: medición inicial en M1 vs. medición inicial en M2).

También se documentaron los cambios físicos observados en las plantas a lo largo del experimento, como cambio de coloración de las hojas, marchitamiento, cambio del ángulo de hojas y además sobrevivencia de los ejemplares.

Se consideraron más viables para implementarse en un techo verde aquellas especies de plantas que mostraron menor variación y valores más altos de F_v/F_m (cercaos a 0.80) en relación a los parámetros abióticos aquí medidos, mayor sobrevivencia y crecimiento. Los criterios para determinar el sustrato más adecuado fueron: la mayor retención de agua en el tiempo, la menor densidad del sustrato, la sobrevivencia y el menor estrés de las plantas.

VII. RESULTADOS

En las siguientes secciones se describirán los resultados en el siguiente orden: técnicas de propagación de las especies, caracterización de las mezclas de sustratos junto con sus componentes, experimento en macetas y por último los de los modelos experimentales.

VII. 1. Propagación de las Especies

VII. 1. 1. Germinación de *Carissa macrocarpa*

C. macrocarpa produce una gran cantidad de semillas a finales de invierno y principios de primavera. Las semillas mostraron un alto porcentaje de germinación (89.5), en un periodo de una semana. Los resultados muestran que la semilla está lista para germinar una vez colectada de frutos maduros. El método con el que se logró tal resultado fue: sumergirlas por 24 horas en agua destilada y posteriormente pasarlas a la cámara de germinación con luz, a 25° C, en cajas Petri con papel absorbente mantenido siempre húmedo. Se asume que no se presentarían dificultades tratando de germinarla en tierra, bajo condiciones estables (humedad siempre disponible, luz y temperatura moderada)

VII. 1. 2 Germinación de *Encelia farinosa*

Encelia farinosa produce una gran cantidad de semillas en condiciones naturales, pero las semillas colectadas de las plantas en la misma época de producción no germinaron o tuvieron una germinación mínima en respuesta a diferentes tratamientos realizados para inducir la germinación (Tabla VII).

Se realizó una prueba de tetrazolio para saber el porcentaje de semillas viables. De una muestra inicial de 183 semillas aparentemente en buen estado se detectó a ojo un 31.15% vanas, las cuales fueron descartadas. Con una muestra de 104 se realizó la prueba de tetrazolio. De esta se observaron 43 endospermos totalmente teñidos (cotiledones junto con embrión), 36 completamente desteñidos y el resto (25) presentó tinción incompleta; estos últimos presentaron bandas teñidas o desteñidas en diferentes secciones, ya sea en parte del embrión o los cotiledones. Podemos concluir que, de la muestra inicial de 183 semillas aparentemente viables, el 68.85% presentaron endospermo y de ellas el 34.12% fueron viables según la tinción (tinción completa), las que representan al mismo tiempo un 23.49% referente a la muestra inicial de 183 semillas.

Tabla VII. Tratamientos aplicados a semillas de *E. farinosa* recién producidas y colectadas. Entre paréntesis se indican los días que tardó en iniciar la germinación.

Tratamiento	n	Germinados
- Sin tratamiento	300	1 (8 días) 1 (19 días)
- 48 horas sumergidas en agua destilada a temperatura ambiente	40	0
- Incisión puntual sobre testa y sumergidas por 48 horas en agua destilada a temperatura ambiente	40	0
- 48 horas sumergidas en agua destilada y posterior tratamiento en agua a 60° C por 10 minutos	40	0
- Sumergidas en solución de 100 ppm de ácido giberélico por 24 horas a temperatura ambiente	20	1 (tres días)
- Sumergidas en solución de 100 ppm de ácido giberélico por una hora	20	0
- Semillas con incisión puntual y sumergidas en solución de 100 ppm de ácido giberélico por una hora	30	0
- Mantenidas en congelador convencional (-10° C) por una hora	30	0
- Mantenidas en refrigerador convencional (9 – 10° C) por 24 horas	30	0
- Semillas sembradas en tierra de donde fueron recolectaron (del CEES) mantenidas bajo temperatura ambiente	30	0
- Semillas sumergidas en solución 100 ppm de ácido giberélico en refrigerador convencional (9 – 10° C) por una hora	30	1 (34 días)
- Semillas sumergidas en solución 100 ppm de ácido giberélico en congelador convencional (-10° C) por una hora	30	1 (20 días)

VII. 1. 2. 1. Experimento de enterramiento de semillas

Sobre el tratamiento de bolsas con semillas enterradas y recuperadas del CEES los resultados de germinación son relativamente mejores que los tratamientos anteriores, pues el número total de germinados para este experimento fue mayor comparado con los tratamientos previos. A partir de un total de 254 semillas recuperadas en diferentes fechas y estaciones del año se registró un total final de 31 germinados hasta el 19 de enero del 2016 (fin del experimento), lo que representa un 12.20% de la muestra inicial (Tabla VIII).

El primer germinado de cada bolsa se registró en las siguientes fechas (entre paréntesis se indica el inicio de la prueba de germinación):

- Primer germinado de la bolsa 1 (7 de Mayo 2015): 13 de mayo 2015
- Primer germinado de la bolsa 2 (8 de Junio 2015): 15 de Septiembre 2015
- Primer germinado de la bolsa 3 (18 de Agosto 2015): 15 de Septiembre 2015
- Primer germinado de la bolsa 6 (7 de Enero 2016): 11 de Enero 2016

De la primera bolsa pasaron seis días para la primera germinación, con un total final de cuatro; la segunda tardó un poco más de tres meses, con solo dos finales; de las tres bolsas recuperadas el 18 de agosto (bolsas 3, 4 y 5), el primer germinado se registró casi un mes después (en la bolsa 3), con un resultado final de 14 para las tres bolsas en conjunto (se toman en conjunto por ser de la misma fecha); para la última bolsa hubo un evento de 10 germinados simultáneos, cuatro días posteriores al inicio de la prueba, resultado que llama la atención por su porcentaje relativamente alto (20% solo para esa bolsa) y rápida germinación.

También se realizó una colecta de plantas jóvenes de *E. farinosa*, en donde se observó que pocos minutos después de realizado el transplante a macetas la gran mayoría de los individuos comenzaban a perder firmeza en todas sus hojas, las cuales no se recuperaron y terminaron por marchitarse. A partir de este problema se observó que podando las plantas en un 50% aproximadamente, manteniéndolas bajo sombra y con riego constante (cada dos días) se regeneraban las hojas en todos los individuos. Una vez regeneradas se expusieron totalmente al sol.

Para el transplante de macetas a los sustratos de prueba resultó muy efectivo sacar las plantas recién regadas y conservando una masa de tierra firme alrededor de las raíces, a manera

de cepellón, con el cual se tuvo especial cuidado en mantener las raíces siempre en su lugar y provocar el menor disturbio posible.

Tabla VIII. Fecha de inicio de prueba de germinación de las bolsas enterradas en el CEES, numero de semillas en cada una después de recuperadas y germinados totales por bolsa.

Bolsa	Inicio de prueba de germinación	Numero de semillas recuperadas	Germinados totales
1	7 de Mayo 2015	50	4
2	8 de Junio 2015	47	2
3	18 de Agosto 2015	35	9
4	18 de Agosto 2015	30	2
5	18 de Agosto 2015	50	3
6	7 de Enero 2016	42	11
	Total	254	31

VII. 1. 3. Propagación *Portulacaria afra*

Sobre *Portulacaria afra* se determinó enraizamiento de todas las estacas. La revisión de enraizamiento de las estacas se hizo 14 días después de iniciado el experimento, para lo cual se seleccionaron tres individuos al azar, se desenterraron y se observaron raíces de 5 cm aproximadamente, finalmente se volvieron a enterrar. No se observó mortalidad y meses después fue evidente el crecimiento en altura de las estacas. Después de este experimento se plantó una muestra de 20 estacas sin enraizador, para lo cual, después del mismo tiempo también se observó enraizado y nula mortalidad. Con estas observaciones se puede concluir un 100% de enraizado bajo las condiciones descritas en la metodología.

VII. 1. 4. Propagación de *Agave desmettiana*

Sobre *Agave desmettiana* no hubo mortalidad de los hijuelos recolectados ni de los hijuelos desarrollados sobre inflorescencias. Se observó que estos últimos empezaban a desarrollar raíz después de las 24 horas en contacto con el agua; igualmente fueron adicionados con enraizador en polvo, aunque es probable que estos no necesiten de aditivos para enraizar según lo observado.

VII. 2. Caracterización de Sustratos y sus Componentes

Las características físicas de cada componente utilizado en las mezclas de suelo se resumen en la Tabla IX. La turba y la vermiculita fueron los elementos más ligeros, porosos y con los valores más altos de capacidad de retención de agua, mientras que los más densos fueron la arena y tierra lama, los cuales también presentaron la menor CRA, junto con el tezontle, el cual mostró una densidad y porcentaje de espacio poroso intermedios, comparado con los demás componentes.

Entre las cuatro mezclas S1 fue aparentemente la menos densa (DA y DR) y la de mayor CRA. Entre S1 y S2 no hubo diferencias significativas en la densidad aparente, pero estas se diferenciaron significativamente del resto; no hubo diferencias significativas de densidad real entre las cuatro mezclas. Según la DA, S3 y S4 fueron las más densas. En cuanto a la capacidad de retención de agua S1 tuvo el mayor valor y se diferenció del resto, aunque entre S2, S3 y S4 no hubo diferencias significativas; el contraste entre S1 y S2 era el resultado esperado al utilizar en el primero un elemento con alta CRA, y en el segundo uno con baja. La mayor porosidad la tuvo S2, el resto tuvo valores no muy contrastantes (Tabla X). Hay que recordar que se seleccionó S1 y S2 para los siguientes experimentos por su contraste de CRA.

Tabla IX. Características físicas de los componentes utilizados en las mezclas para sustratos (n=10, excepto porosidad).

Componente	Densidad aparente (g/cm ³)	Densidad real (g/cm ³)	Porosidad (%)	Capacidad de retención de agua (%)
Turba de <i>Sphagnum</i>	0.10 ± 0.00	0.43 ± .10	76.8	90.37 ± 0.54
Tierra lama	1.34 ± 0.04	2.89 ± .58	53	25.87 ± 3.82
Arena	1.61 ± 0.08	2.77 ± 0.41	45	19.89 ± 0.96
Vermiculita	0.09 ± 0.00	1.02 ± 0.60	92	82.26 ± 3.24
Tezontle	0.57 ± 0.11	1.82 ± 0 .60	66.4	20.01 ± 3.72

Tabla X. Características físicas de las mezclas (n=10, excepto porosidad). Superíndices diferentes indican diferencias significativas entre sustratos ($p < 0.05$), iguales lo contrario.

Sustrato	Densidad aparente (g/cm ³)	Densidad real (g/cm ³)	Porosidad (%)	Capacidad de retención de agua (%)
1	1.10 ± 0.10 ^a	1.77 ± 0.36 ^a	37.43	34.13 ± 1.26 ^a
2	1.20 ± 0.04 ^a	2.14 ± 0.49 ^a	43.88	28.99 ± 2.02 ^b
3	1.40 ± 0.13 ^b	2.27 ± 0.68 ^a	38.10	27.20 ± 1.52 ^b
4	1.30 ± 0.07 ^b	2.04 ± 0.44 ^a	36.12	28.99 ± 2.91 ^b

VII. 3. Diferencia de Humedad Volumétrica entre Sustratos

Las mezclas, S1 y S2, presentaron diferencias en su CRA, y gráficamente se apreció una diferencia marcada en el porcentaje promedio de humedad volumétrica (% de θ_v) en el tiempo. Cuando las macetas conteniendo cada mezcla fueron expuestas a la intemperie, S1 inició con un 35.37% y S2 con 29.83% de humedad volumétrica en promedio; al final del experimento en S1 se registró un promedio de 9.27% y en S2 de 6.13%.

Los análisis de regresión de la humedad con el tiempo y la determinación de intervalos de confianza para las rectas de ambos sustratos, indican que probablemente hubo coincidencias en sus valores de % de θ_v . En cuanto a las respectivas rectas de mejor ajuste resultaron las siguientes ecuaciones y coeficientes de determinación:

- Mezcla 1: $y = 34.185 - (0.0890x)$; $r^2 = 0.91$
- Mezcla 2: $y = 30.514 - (0.0826x)$; $r^2 = 0.87$

Los intervalos de confianza del 95% para cada pendiente fueron:

- Mezcla 1: $-0.1012 < \beta < -0.0766$
- Mezcla 2: $-0.0967 < \beta < -0.0685$

Evidentemente los intervalos de confianza para las pendientes de ambas rectas se solapan, lo que indica que en un determinado punto en el tiempo las humedades de ambos sustratos llegan a ser iguales. Dicho de otra forma, el contenido de agua, temporalmente, no siempre fue diferente entre S1 y S2 según los datos obtenidos (Figura 3).

En la Figura 4 se observa que ambos sustratos perdieron agua de manera similar. Los puntos promedios de cada sustrato nunca se traslaparon, aunque las desviaciones estándar podrían indicar que en realidad el contenido de agua no difirió tanto entre las mezclas. La comparación muestra diferencias significativas en los primeros puntos del muestreo, pero a partir del tercer punto y hasta el final del experimento no se dan diferencias significativas, con excepción del penúltimo.

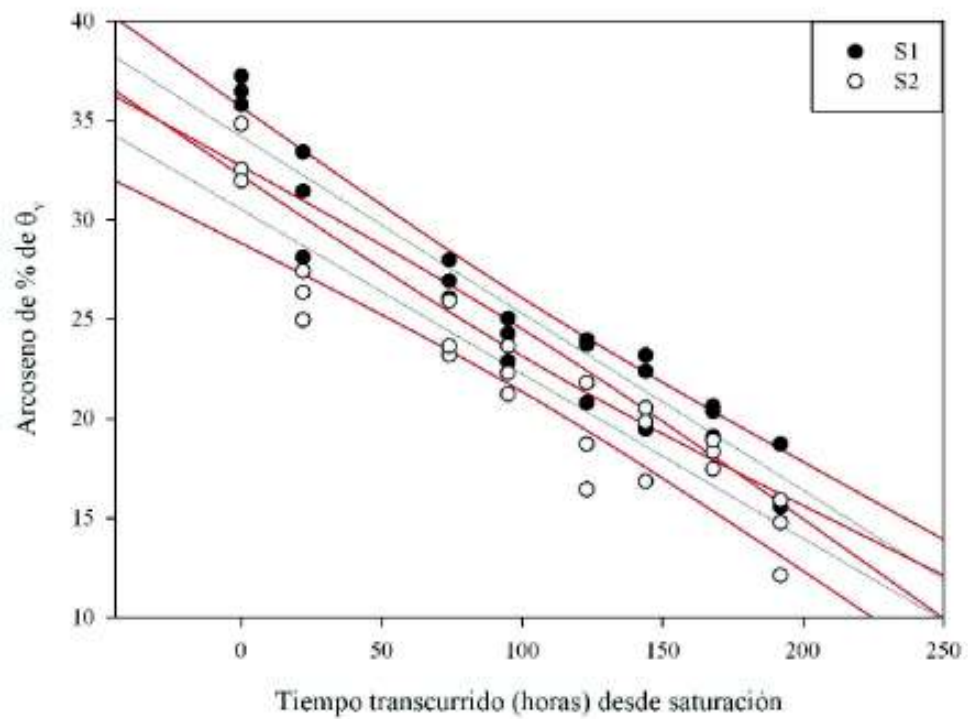


Figura 3. Dispersión de todos los valores del arcoseno del porcentaje de humedad volumétrica (% de θ_v). Cada punto representa el valor convertido de una sola repetición. Se incluyen las rectas de mejor ajuste: la superior correspondiente a S1 y la inferior a S2, además de sus respectivos intervalos del 95% de confianza.

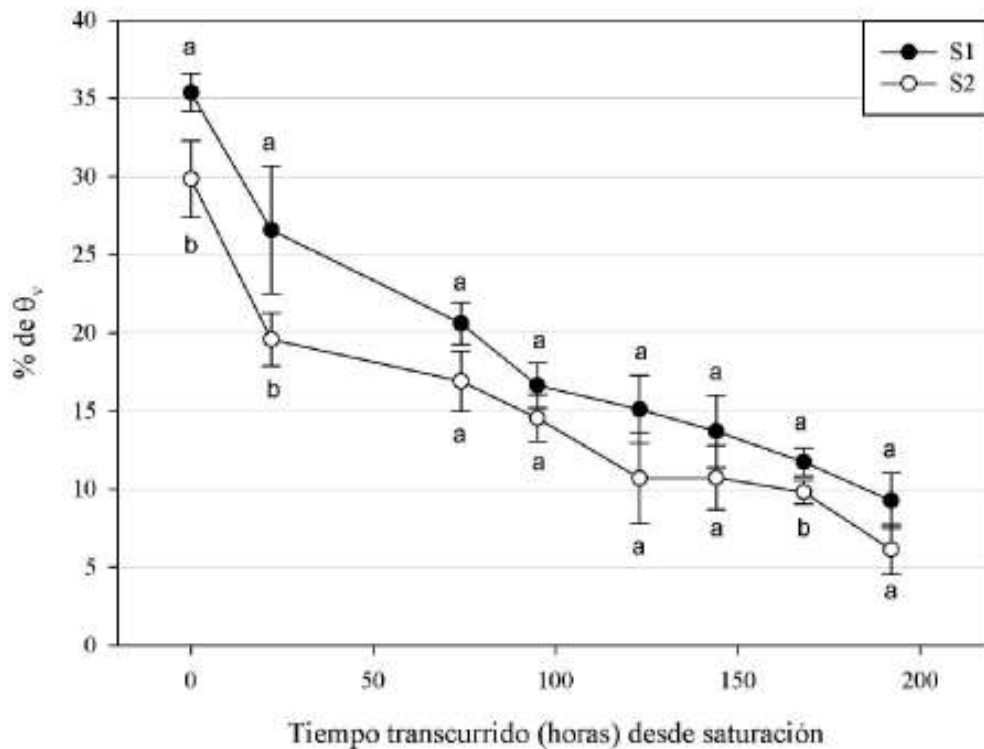


Figura 4. Porcentaje volumétrico de agua (% de θ_v) en relación con el tiempo transcurrido después de riego a saturación. El primer valor al tiempo 0 corresponde a saturación de agua. Cada punto representa el promedio \pm desviación estándar de 3 repeticiones. Los pares de puntos con letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$), con la misma letra lo contrario.

Los datos obtenidos por medio de los sensores TMS siguen un patrón similar a los mostrados en la Figura 4, en el que se observa una distinción de ambos sustratos, siendo la curva de S1 superior a la de S2 para casi todo el periodo de este experimento (Figura 5). Las líneas rectas verticales en la Figura 5 representan periodos de lluvia en donde la humedad aumentaba por igual en ambos sustratos; en estos momentos el % de θ_v en los dos fue muy similar y una vez que empezaron a perder agua las curvas se diferencian. Por ser datos sin repeticiones no fue posible realizar análisis estadísticos, aunque se hace hincapié en que el patrón de pérdida de agua es similar para S1 y S2 y en este caso S1 conservó más agua en el tiempo.

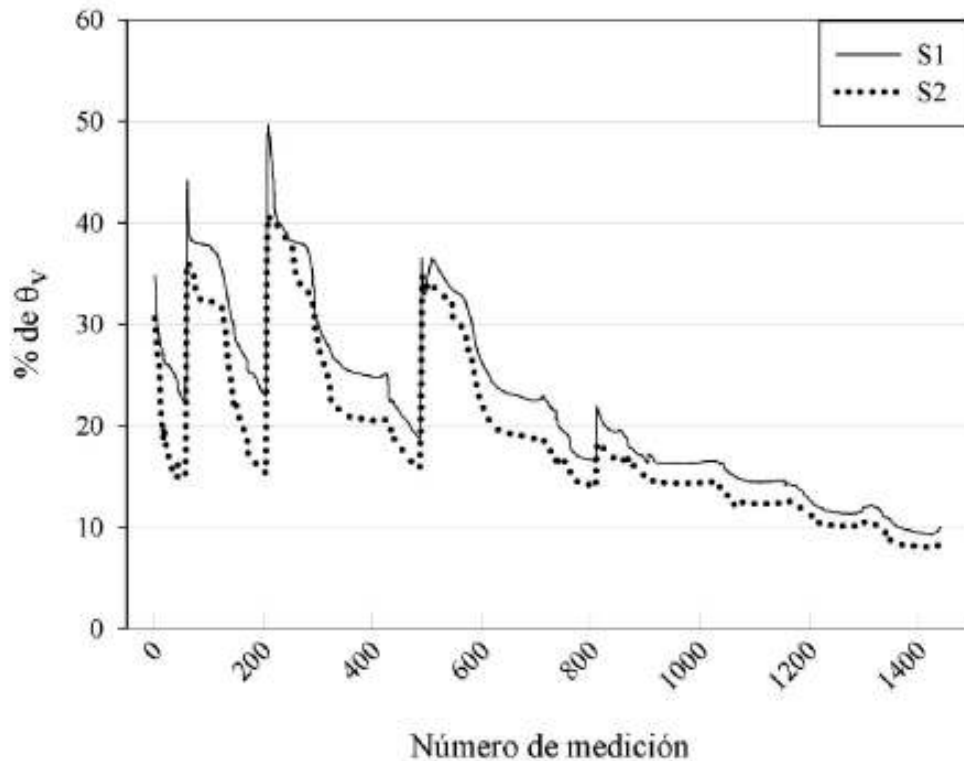


Figura 5. Cambios en la humedad (% de θ_v) de S1 y S2 durante 10 días a la intemperie. El eje X representa el número de medición en el tiempo; cada medición corresponde a una toma de datos cada cinco minutos en una sola maceta por sustrato.

VII. 4. Experimento de Plantas en Macetas

A continuación se presentan los resultados del experimento en macetas individuales. Se realizaron análisis de correlación de Spearman para medir la relación entre la humedad del sustrato y las variables fisiológicas. También se hizo una comparación del % de θ_v entre sustratos por especie.

VII. 4. 1. Relación entre humedad del sustrato y variables fisiológicas

En general se encontró que la humedad del sustrato no influyó significativamente en la variación de los parámetros fisiológicos (Tabla XI). Los únicos resultados significativos correspondieron al agave, para Fv/Fm en S1 y para ICC en S2; aun así, se considera una relación débil entre ambas variables. Observando gráficas individuales para todos los casos no se detectó algún patrón en los datos dispersos de ICC y Fv/Fm en relación a la humedad del suelo.

Tabla XI. Coeficientes de correlación de Spearman (r_s) entre las variables dependientes Fv/Fm e ICC y la independiente % de θ_v (convertida a arcoseno para el análisis), para cada especie en ambos sustratos. "*" indica significancia del coeficiente ($p < 0.05$).

Especie (sustrato)	Fv/Fm vs % de θ_v	ICC vs % de θ_v
	r_s	r_s
<i>A. desmettiana</i> (S1)	0.13	0.35*
<i>A. desmettiana</i> (S2)	-0.28*	0.27
<i>C. macrocarpa</i> (S1)	0.23	-0.28
<i>C. macrocarpa</i> (S2)	0.03	-0.25
<i>E. farinosa</i> (S1)	0.18	0.15
<i>E. farinosa</i> (S2)	0.06	0.23
<i>P. afra</i> (S1)	0.21	0.23
<i>P. afra</i> (S2)	0.22	-0.63

Con valores tan bajos, y en su mayoría no significativos, se puede concluir que la variación de la humedad de los sustratos explica muy poco la variación de los parámetros fisiológicos. Dicho de otra forma, el contenido de clorofila y el estrés medido por medio de Fv/Fm varió en muy poca medida conforme aumentaba o disminuía la humedad de los sustratos. Esto no quiere decir que la poca disponibilidad de agua en el suelo no sea un factor que no produzca estrés o variación en estos parámetros fisiológicos, pues se ha demostrado en otros trabajos los efectos que el contenido de agua en el medio de crecimiento tiene sobre Fv/Fm, además de otros efectos fisiológicos que provoca el estrés hídrico.

VII. 4. 2. Comportamiento del agua en los sustratos

Se compararon los valores máximos y mínimos de los promedios del % de θ_v de cada especie en ambos sustratos. En la Figura 6 se aprecian gráficamente estos resultados. Observando los promedios se nota que los máximos en S1 son ligeramente mayores a los de S2 en todas las especies, aunque las desviaciones estándar podrían indicar que no son tan diferentes, y de hecho no se detectaron diferencias significativas entre sustratos. Entre todos los casos el valor más alto de máximos corresponde a *A. desmettiana*, seguido de *C. macrocarpa*, que tuvo un valor muy similar, ambos en S1. En S2 aparentemente carisa tuvo el valor más alto entre los máximos, seguido del agave.

En cuanto a los mínimos ocurre un patrón similar cuando se comparan los promedios entre S1 y S2, donde S1 aparentemente tuvo valores mayores de mínimos en todas las especies. No se detectaron diferencias significativas entre sustratos por especie.

A partir de la regresión lineal de humedad del sustrato con el tiempo, en todos los casos (comparando sustratos por especie), se determinó que los intervalos de confianza para las rectas se solaparon (Tabla XII), lo que indica, al igual que en el experimento de humedad sin plantas, que no en todo momento el contenido de agua en ambos sustratos difirió significativamente, al menos durante este periodo experimental. Tal resultado se puede deducir simplemente observando la dispersión de datos para ambos sustratos, pues hay puntos de S1 y S2 no muy separados a la misma hora de medición. Para ilustrar el patrón de dispersión se ejemplifica con la Figura 7, que muestra el resultado para *A. desmettiana*; para el resto de las especies se detectó un patrón muy similar.

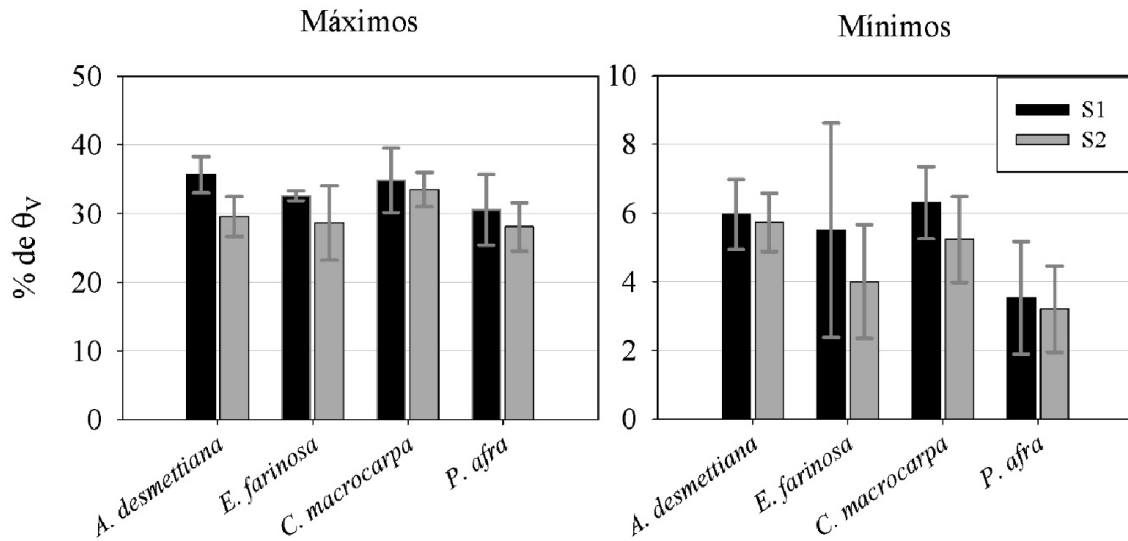


Figura 6. Gráficas de valores máximos y mínimos del % de θ_v en ambos sustratos por especie. Cada barra corresponde a un promedio de tres repeticiones. Las barras de error corresponden a \pm una desviación estándar

TablaXII. Ecuaciones de las rectas de mejor ajuste correspondientes a la correlación lineal entre el tiempo y el arcoseno del % de θ_v , para cada especie en ambos sustratos. Se definen los intervalos del 95% de confianza (IC) para cada pendiente y, comparando sustratos por especie, se especifica si se solapan.

Especie (sustrato)	Ecuación	IC del 95%	Solape
<i>A. desmettiana</i> (S1)	$y = 32.717 - (0.031x)$	$-0.0362 < \beta < -0.0261$	si
<i>A. desmettiana</i> (S2)	$y = 28.053 - (0.020x)$	$-0.0262 < \beta < -0.0155$	
<i>E. farinosa</i> (S1)	$y = 28.781 - (0.023x)$	$-0.0284 < \beta < -0.0179$	si
<i>E. farinosa</i> (S2)	$y = 26.833 - (0.021x)$	$-0.0268 < \beta < -0.0165$	
<i>C. macrocarpa</i> (S1)	$y = 28.548 - (0.039x)$	$-0.0464 < \beta < -0.0333$	si
<i>C. macrocarpa</i> (S2)	$y = 29.243 - (0.050x)$	$-0.0573 < \beta < -0.0444$	
<i>P. afra</i> (S1)	$y = 27.053 - (0.027x)$	$-0.0330 < \beta < -0.0209$	si
<i>P. afra</i> (S2)	$y = 27.047 - (0.028x)$	$-0.0340 < \beta < -0.0235$	

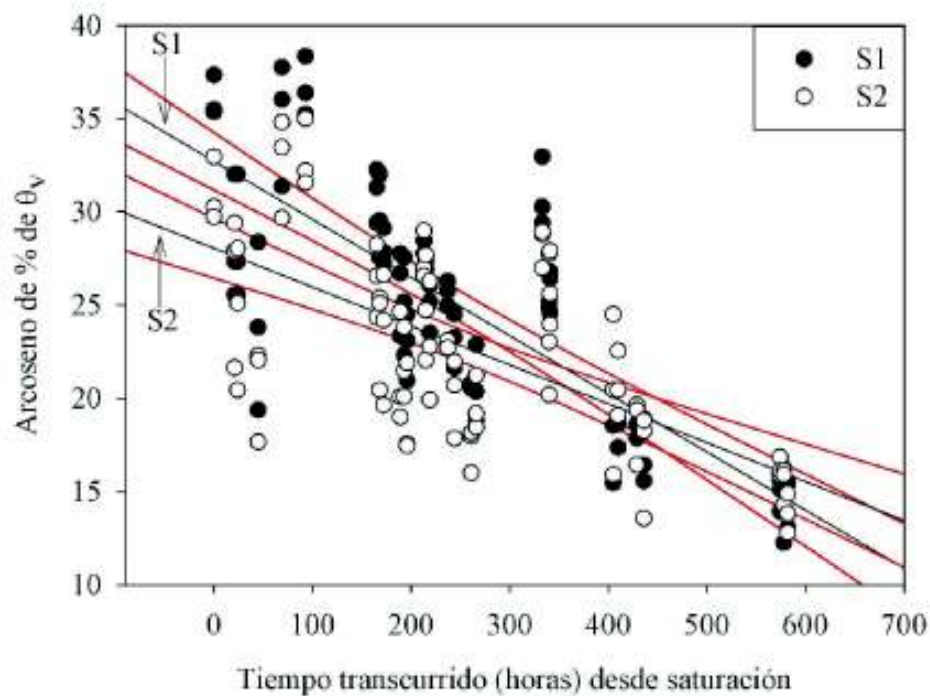


Figura 7. Gráfica que muestra la dispersión de valores de humedad convertidos a arcoseno para S1 y S2 con la especie *Agave desmettiana*. Se incluyen las respectivas rectas de mejor ajuste para el conjunto de datos de cada sustrato (S1 y S2), también se muestran sus intervalos del 95% de confianza. Cada punto representa el valor convertido de una sola repetición.

Considerando la sobrevivencia de las especies en el periodo experimental se puede deducir cuál de ellas podría ser menos apta para soportar condiciones de sequía. *C. macrocarpa* mostró señales físicas de estrés en las hojas cuando el contenido de agua en el sustrato llegó al valor mínimo promedio (para ambos sustratos). Las hojas se mostraron arrugadas, ásperas, poco quebradizas, con los bordes doblados hacia el envés, fue evidente la pérdida de turgencia y también cambiaron a un color verde muy pálido. Esto se observó el día 31 de julio por la mañana (10 am). Para el día siguiente de muestreo, el 3 de agosto, todas las plantas de la especie mostraron las hojas totalmente secas, y a partir de este día no se pudieron realizar más mediciones. El 26 de julio por la mañana se registraron 18.5 mm de precipitación, a partir de este evento no hubo lluvia hasta el 28 de julio, en donde se registró una de 4 mm a las 11 am, y el 29 a las 5 pm una de 0.1 mm, y no hubo más hasta el 2 de agosto. El 27 de agosto por la mañana (después de la lluvia del día 26) se registró en los sustratos un promedio de humedad

de 23.1% para S1 y 17.63% para S2. Se observó una caída general de la humedad en ambos y para el día 31 los valores habían llegado a un 6.30% para S1 y 5.23% para S2, día en el que se observaron hojas con signos de estrés y último de muestreo para esta especie. Se puede deducir, a partir de esta información, que *C. macrocarpa* puede soportar aproximadamente 5 días sin riego, después de un evento que aporte un contenido de agua moderado en el sustrato. Quizá podrían ser menos los días, pues el evento del 28 y 29, aunque menor, pudo haber ralentizado la pérdida de agua en los medios de crecimiento, y al mismo tiempo, alargado el tiempo de sobrevivencia de las plantas de *C. macrocarpa*. De los individuos afectados sólo uno regeneró hojas después de aplicarle riego constante dentro del sombreadero.

El 13 de agosto se dio por concluido el experimento, pues en este día se registró el mínimo de humedad en las especies restantes. Cuando se registraron estos valores se pudo observar que los márgenes de las pencas de los agaves se enrollaban ligeramente hacia el haz, también la dirección de las pencas cambió, dirigiéndose más hacia el eje central de la planta, siendo evidente una posición más vertical. En cuanto al *P. afra* se pudo apreciar la pérdida de turgencia de la mayoría de las hojas en ambos sustratos, aunque se observó recuperación una vez regadas. *E. farinosa* también fue físicamente afectada por la falta de agua en el sustrato, ya que sus hojas se enrollaron ligeramente sobre sí mismas, dirigiendo los bordes hacia el haz. Esta especie fue muy afectada antes de concluir el experimento, pues el 7 de agosto se observó que uno de los individuos de prueba (en S2) había perdido la mayoría de sus hojas y solo quedaba una de tamaño muy pequeño, y por esto no fue posible tomar mediciones de ICC. Este día en la mañana se registró un promedio del % de θ_v de 8.96 para S1 y 8.36 para S2. Hasta este momento el resto de las plantas de *E. farinosa* también habían perdido algunas hojas y no hubo recuperación días después de culminado el experimento. A pesar de esto, se observó en otras plantas de la misma especie la regeneración de hojas después de aplicar riego constante, incluso a exposición solar completa. No se registró mortalidad de las plantas de *A. desmettiana* y *P. afra*, aún después de concluido el experimento; además, las señales físicas de estrés disminuyeron en gran medida con el riego frecuente a saturación.

VII. 5. Modelo Experimental de Techo Verde: Fisiología y Microclima

A continuación se exponen los resultados obtenidos a partir de los modelos experimentales de techo verde. Para fines prácticos se denominará M1 al modelo en el que se usó S1 y M2 en el que se usó S2. Primero se describirán los resultados de los parámetros fisiológicos y su relación con las variables abióticas; después se mostrarán los valores por especie de F_v/F_m e ICC y a partir de esto se deduce cuál de las especies podría ser más apta a soportar las condiciones temporales del periodo experimental. Seguido de esto se analizan los datos de temperatura dentro de los modelos experimentales mediante su comparación con el control y la temperatura ambiente. Se incluyen también los resultados de temperatura superficial de los modelos experimentales y un techo convencional. Se muestra el comportamiento de la humedad entre ambos sustratos y por último el crecimiento de las especies en los modelos experimentales.

VII. 5. 1. Relación de parámetros fisiológicos con variables abióticas

En ciertos casos las variables dependientes (ICC y F_v/F_m) no pasaron la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, violando un requisito para el coeficiente de correlación de Pearson; para tales casos se optó analizarlos por medio del coeficiente de correlación de rangos de Spearman (r_s), cuyos valores se incluyen en las Tablas XIII y XIV en donde fue requerido.

En general se observó una correlación negativa y significativa (en algunos casos tendiendo a fuerte) entre F_v/F_m y la RFA y la temperatura ambiente (TA), con valores de r y r_s (según sea el caso) entre 0.5 y 0.8, para la mayoría de las especies en ambos sustratos. Los resultados indican que el valor de F_v/F_m declina cuando TA y RFA incrementan. Por otro lado, con la humedad del sustrato se dio una correlación débil o no significativa (Tabla XIII), coincidiendo con lo observado en el experimento con macetas.

Tabla XIII. Resultados de los análisis de correlación entre las variables abióticas independientes: radiación fotosintéticamente activa (RFA), temperatura ambiente (TA), porcentaje volumétrico de agua (% de θ_v) y el cociente de fluorescencia variable y fluorescencia máxima (Fv/Fm) (variable dependiente) para cada especie creciendo en el sustrato 1 (S1) y 2 (S2); “*” indica $p < 0.05$. Resultados sin r^2 ni F indican que solo corresponde r_s .

Fv/Fm vs RFA	r o r_s	r^2	F
<i>Agave desmettiana</i> (S1)	-0.852	0.726	90.018*
<i>Agave desmettiana</i> (S2)	-0.706*		
<i>Encelia farinosa</i> (S1)	-0.911*		
<i>Encelia farinosa</i> (S2)	-0.894*		
<i>Carissa macrocarpa</i> (S1)	-0.819	0.671	69.407*
<i>Carissa macrocarpa</i> (S2)	-0.837	0.700	79.334*
<i>Portulacaria afra</i> (S1)	-0.905*		
<i>Portulacaria afra</i> (S2)	-0.838*		
Fv/Fm vs TA			
<i>Agave desmettiana</i> (S1)	-0.785	0.616	54.437*
<i>Agave desmettiana</i> (S2)	-0.608	0.370	19.965*
<i>Encelia farinosa</i> (S1)	-0.856*		
<i>Encelia farinosa</i> (S2)	-0.913*		
<i>Carissa macrocarpa</i> (S1)	-0.743	0.553	42.017*
<i>Carissa macrocarpa</i> (S2)	-0.815	0.664	67.129*
<i>Portulacaria afra</i> (S1)	-0.812	0.659	65.637*
<i>Portulacaria afra</i> (S2)	-0.874*		

Tabla XIII. Continuación.

Fv/Fm vs % de θ_v (convertido a arcoseno)			
<i>Agave desmettiana</i> (S1)	0.277		
<i>Agave desmettiana</i> (S2)	0.170		
<i>Encelia farinosa</i> (S1)	0.307	0.094	3.528
<i>Encelia farinosa</i> (S2)	0.360*		
<i>Carissa macrocarpa</i> (S1)	0.253		
<i>Carissa macrocarpa</i> (S2)	0.498	0.248	11.194*
<i>Portulacaria afra</i> (S1)	0.397*		
<i>Portulacaria afra</i> (S2)	0.521*		

En cuanto al contenido de clorofila existió una relación débil con las variables abióticas para todas las especies en ambos sustratos, aunque no todos fueron significativos (Tabla XIV). Este resultado podría indicar que la respuesta de variación del contenido relativo de clorofila no es tan sensible a los cambios de las variables abióticas aquí medidas. Solo *C. macrocarpa* tuvo resultados significativos con todos los regresores y en ambos sustratos, mientras que para *A. desmettiana* fue lo contrario, pues no hubo significancia en ningún caso.

Tabla XIV. Resultados de los análisis de correlación lineal simple entre el índice de contenido de clorofila (ICC) y cada variable abiótica (ver abreviaciones de Tabla XIII) para cada especie creciendo en el sustrato 1 (S1) y 2 (S2). Se usa la misma correspondencia de coeficientes indicada en la tabla XIV. “*” indica $p < 0.05$

ICC vs RFA	r o r_s	r^2	F
<i>Agave desmettiana</i> (S1)	0.084	0.007	0.245
<i>Agave desmettiana</i> (S2)	0.176		
<i>Encelia farinosa</i> (S1)	0.390	0.152	6.102*
<i>Encelia farinosa</i> (S2)	0.291	0.084	3.141
<i>Carissa macrocarpa</i> (S1)	0.5	0.25	11.321*
<i>Carissa macrocarpa</i> (S2)	0.464*		
<i>Portulacaria afra</i> (S1)	0.557*		
<i>Portulacaria afra</i> (S2)	0.199		

Tabla XV. Continuación.

ICC vs TA			
<i>Agave desmettiana</i> (S1)	0.072	0.005	0.182
<i>Agave desmettiana</i> (S2)	0.301		
<i>Encelia farinosa</i> (S1)	0.5	0.25	11.338*
<i>Encelia farinosa</i> (S2)	0.241	0.058	2.100
<i>Carissa macrocarpa</i> (S1)	0.532	0.283	13.397*
<i>Carissa macrocarpa</i> (S2)	0.475	0.226	9.931*
<i>Portulacaria afra</i> (S1)	0.403	0.162	6.578*
<i>Portulacaria afra</i> (S2)	0.143		
ICC vs % de θ_v (convertido a arcoseno)			
<i>Agave desmettiana</i> (S1)	0.168	0.028	0.991
<i>Agave desmettiana</i> (S2)	-0.009		
<i>Encelia farinosa</i> (S1)	0.307	0.094	3.539
<i>Encelia farinosa</i> (S2)	0.495	0.245	11.018*
<i>Carissa macrocarpa</i> (S1)	0.440	0.194	8.170*
<i>Carissa macrocarpa</i> (S2)	0.495	0.245	11.010*
<i>Portulacaria afra</i> (S1)	0.175	0.030	1.068
<i>Portulacaria afra</i> (S2)	-0.439*		

VIII. 5. 2. Comparación de Fv/Fm entre especies

Durante las mediciones de la mañana (entre 8 y 9 am aproximadamente) se observó una tendencia en todas las especies a presentar valores de Fv/Fm cercanos a 0.80. Por otro lado, los datos de mediodía (entre 12 y 1 pm) están mucho más dispersos por especie en ambos modelos, habiendo casos en los que Fv/Fm llegó a valores cercanos o iguales a cero (Figuras 8 y 9). El promedio de RFA por la mañana, durante las mediciones de variables fisiológicas en los días de muestreo, fue de $659.54 \pm 286.73 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y TA de $30.81 \pm 2.31^\circ \text{C}$; al mediodía la RFA fue de $1469.07 \pm 336.90 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y TA de $37.92 \pm 3.97^\circ \text{C}$.

La dispersión de valores de Fv/Fm al mediodía muestra que las especies no reaccionaron de igual forma a la temperatura y radiación solar altas (Figura 8b y 9b).

Comparando todos los datos de la mañana en conjunto entre modelos experimentales y por especie, no se detectaron diferencias significativas, lo mismo ocurre comparando los datos de mediodía. Con esta información podemos concluir que entre sustratos es probable que Fv/Fm haya sido muy similar por especie probada, es decir, probablemente no hubo efecto de los sustratos sobre Fv/Fm.

La especie que tuvo mayor variación de Fv/Fm fue *C. macrocarpa* (Tabla XV y Figura 10). Este resultado podría indicar que, bajo condiciones de techo verde, puede ser más susceptible a sufrir estrés fotosintético ocasionado por la exposición a niveles altos de radiación solar y temperatura. Los valores de las desviaciones estándar (s) y coeficientes de variación (C. V.) demuestran la alta variación de Fv/Fm en carisa, lo que indica que en parte del periodo experimental sus valores fueron muy cercanos o iguales a cero; de hecho, en la mitad de los días de muestreo los promedios de Fv/Fm al medio día estuvieron dentro del rango 0.0 – 0.19 en M1 y en M2 fueron once días dentro del mismo intervalo al mediodía. Cabe destacar, como se observó en la sección anterior, que, de entre las cuatro especies, fue la primera en perder todas sus hojas debido a una muy baja humedad del sustrato y en este experimento ocurrió algo similar. Cuando la humedad volumétrica promedio en ambos modelos experimentales llegó a \approx 5%, algunos ejemplares perdieron la mayoría de sus hojas. En total fueron cinco plantas de carisa en M1 y dos en M2 las afectadas por este evento. Estas plantas no se reemplazaron, ya que al quedar pocas hojas vivas se continuó el muestreo de variables fisiológicas en ellas.

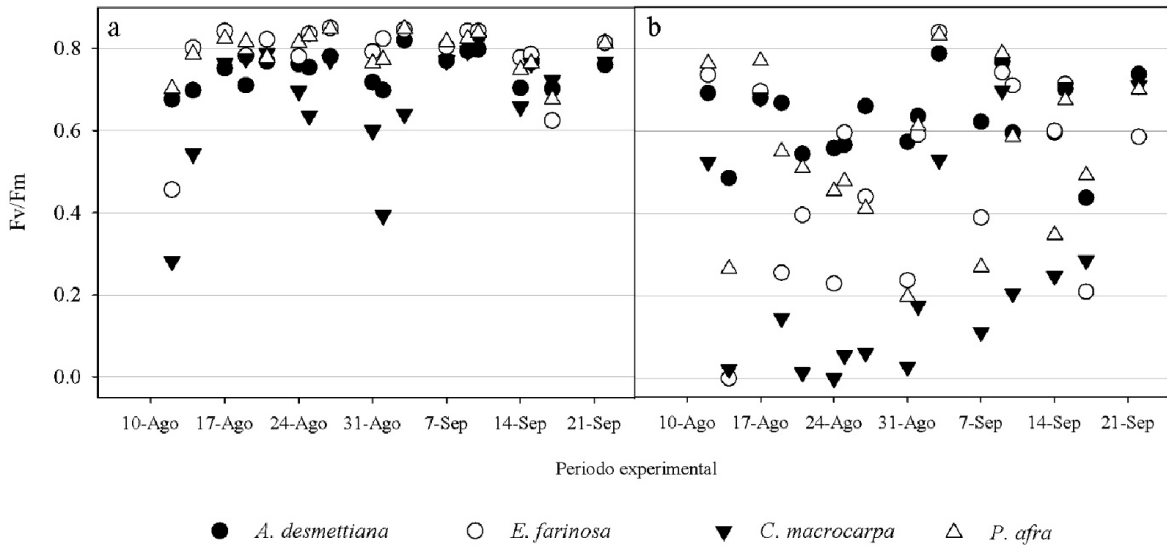


Figura 8. Cociente de fluorescencia variable y fluorescencia máxima (Fv/Fm) durante los 18 días de muestreo en el modelo experimental 1. Se muestran los valores para las cuatro especies estudiadas. Cada punto representa un promedio (n=5) de mediciones por la mañana (a) y al mediodía (b) en un día de muestreo.

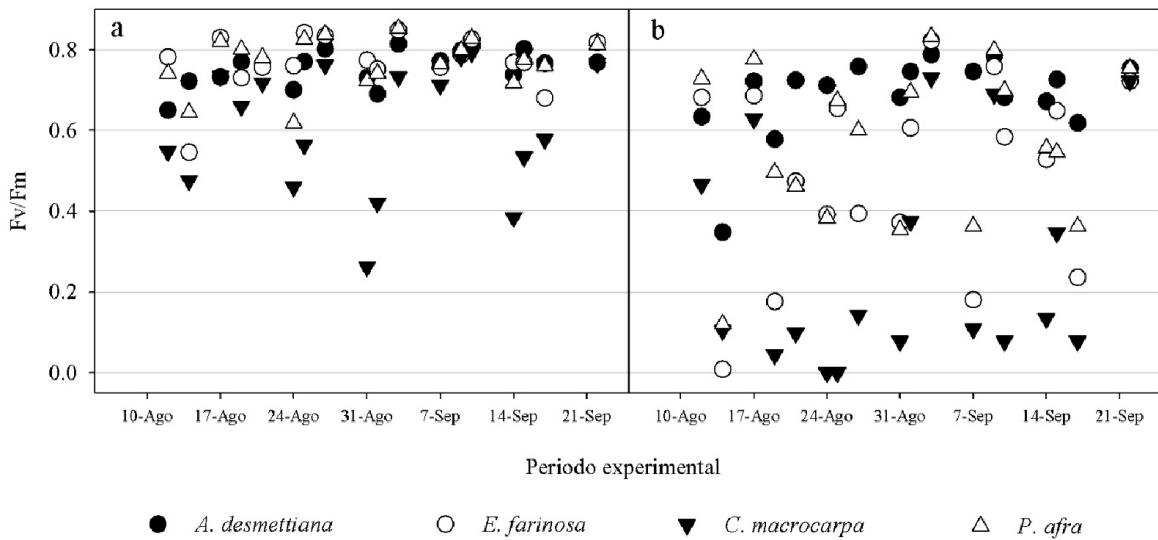


Figura 9. Cociente de fluorescencia variable y fluorescencia máxima (Fv/Fm) durante los 18 días de muestreo en el modelo experimental 2. Se muestran los valores para las cuatro especies estudiadas. Cada punto representa un promedio (n=5) de mediciones por la mañana (a) y al mediodía (b) en un día de muestreo.

Agave desmettiana fue la especie con la menor variación de Fv/Fm al mediodía, e incluso este promedio en ambos modelos no se alejó mucho del de la mañana (Tabla XV y Figura 10), además, fue la única especie que no tuvo diferencia significativa entre mañana y mediodía, el resto sí (en ambos modelos). Se puede deducir que, durante el experimento, esta especie fue la que mantuvo sus valores de Fv/Fm relativamente más constantes, y además altos, a pesar de las variaciones extremas de los factores abióticos. El valor promedio más bajo registrado fue de 0.44, que correspondió a un muestreo de mediodía. Los bajos coeficientes de variación y una media cercana al valor óptimo de Fv/Fm podrían indicar mayor resistencia de la especie hacia condiciones estresantes.

Tanto *E. farinosa* como *P. afra* tuvieron comportamientos parecidos, ambas tuvieron promedios de Fv/Fm similares en los muestreos de la mañana y en los de mediodía. Sin embargo, *P. afra* tuvo menor variación de Fv/Fm en comparación con *E. farinosa* (Tabla XV y Figura 10). Generalmente los valores en ambas especies estuvieron alejados de cero la mayor parte del tiempo; el valor de Fv/Fm más bajo de *E. farinosa* fue de 0.0 en M1, mientras que en M2 tres días tuvo valores dentro del rango 0 - 0.19, esto al mediodía. El valor promedio más bajo de *P. afra* fue de 0.20 en M1 y 0.12 en M2, ambos al mediodía.

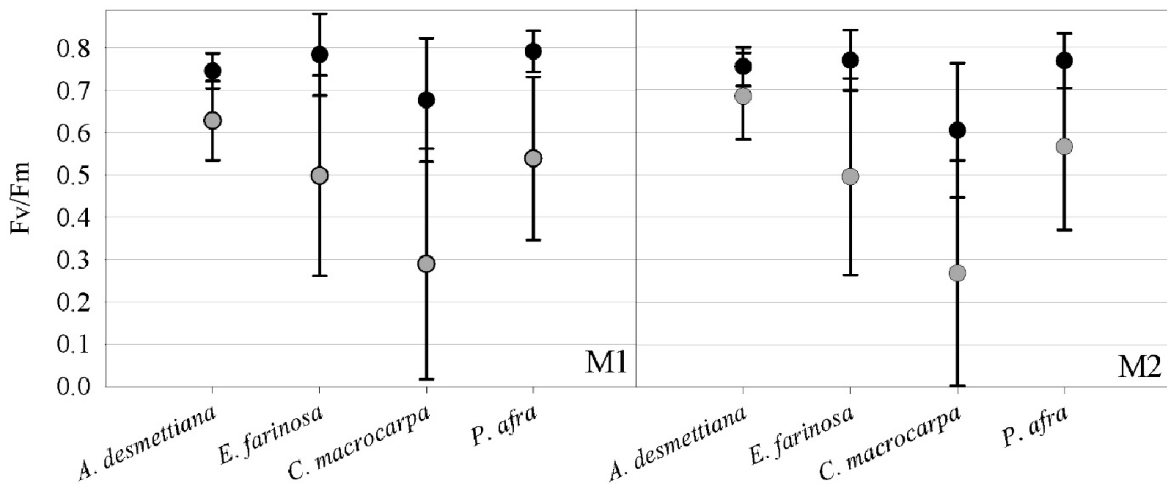


Figura 10. Promedios \pm desviación estándar de Fv/Fm por especie en todo el periodo experimental en ambos modelos experimentales (M1 y M2). Los puntos negros representan la media de mediciones por la mañana y los grises la de mediodía.

Tabla XV. Valores promedio \pm desviación estándar de Fv/Fm por la mañana y al mediodía, por especie y modelo. Se muestran también los respectivos coeficientes de variación (C. V.). Cada promedio se calculó a partir de todos los datos capturados durante el experimento en su respectiva hora de muestreo.

M1 - Mañana	<i>A. desmettiana</i>	<i>E. farinosa</i>	<i>C. macrocarpa</i>	<i>P. afra</i>
Promedio	0.75 \pm 0.041	0.78 \pm 0.096	0.68 \pm 0.146	0.79 \pm 0.048
C. V.	5.52	12.32	21.57	6.09
M1 - Mediodía				
Promedio	0.63 \pm 0.093	0.50 \pm 0.236	0.29 \pm 0.272	0.54 \pm 0.193
C. V.	14.92	47.54	94.24	35.80
M2 - Mañana				
Promedio	0.75 \pm 0.045	0.77 \pm 0.070	0.60 \pm 0.158	0.77 \pm 0.063
C. V.	6.03	9.21	26.17	8.32
M2 - Mediodía				
Promedio	0.69 \pm 0.101	0.50 \pm 0.231	0.27 \pm 0.265	0.57 \pm 0.196
C. V.	14.85	46.69	99.09	34.63

VII. 5. 3. Comportamiento del Índice de Contenido de Clorofila

Por especie no existieron diferencias significativas del ICC entre ambas horas de muestreo ni entre modelos experimentales. El contenido relativo de clorofila determinado en cada especie tuvo un comportamiento diferente al de Fv/Fm, donde los valores de la mañana llegaron a ser muy similares a los de mediodía durante los días de muestreo (Figura 11).

Los resultados podrían indicar que las especies se mantuvieron en sus niveles normales de concentración de clorofila durante el periodo experimental. En general se observa que los coeficientes de variación por especie, tanto en la mañana como al mediodía, no son muy diferentes, es decir, a pesar de que el valor promedio de ICC haya diferido entre especies, la proporción de variación fue similar entre ellas (Tabla XVI).

Tabla XVI. Índice de contenido de clorofila (ICC) en la mañana y al mediodía para cada especie en los modelos (M1 y M2). Se muestran los promedios \pm desviación estándar por especie junto con los coeficientes de variación (C. V.). Cada promedio se calculó a partir de todos los datos capturados durante el experimento a su respectiva hora de muestreo.

M1 - Mañana	<i>A. desmettiana</i>	<i>E. farinosa</i>	<i>C. macrocarpa</i>	<i>P. afra</i>
\bar{x} ,	21.29 \pm 3.84	20.72 \pm 3.53	72.36 \pm 13.16	16.13 \pm 1.60
C. V.	18.07	17.03	18.19	9.94
M1 - Mediodía				
\bar{x} ,	22.78 \pm 4.76	23.05 \pm 4.29	82.84 \pm 15.56	18.34 \pm 2.56
C. V.	20.91	18.65	18.78	13.97
M2 - Mañana				
\bar{x} ,	26.08 \pm 4.09	21.91 \pm 3.58	67.24 \pm 9.84	17.96 \pm 12.18
C. V.	15.69	16.34	14.63	12.16
M2 - Mediodía				
\bar{x} ,	28.05 \pm 5.56	24.33 \pm 4.74	75.57 \pm 14.47	19.88 \pm 4.14
C. V.	19.83	19.48	19.14	20.86

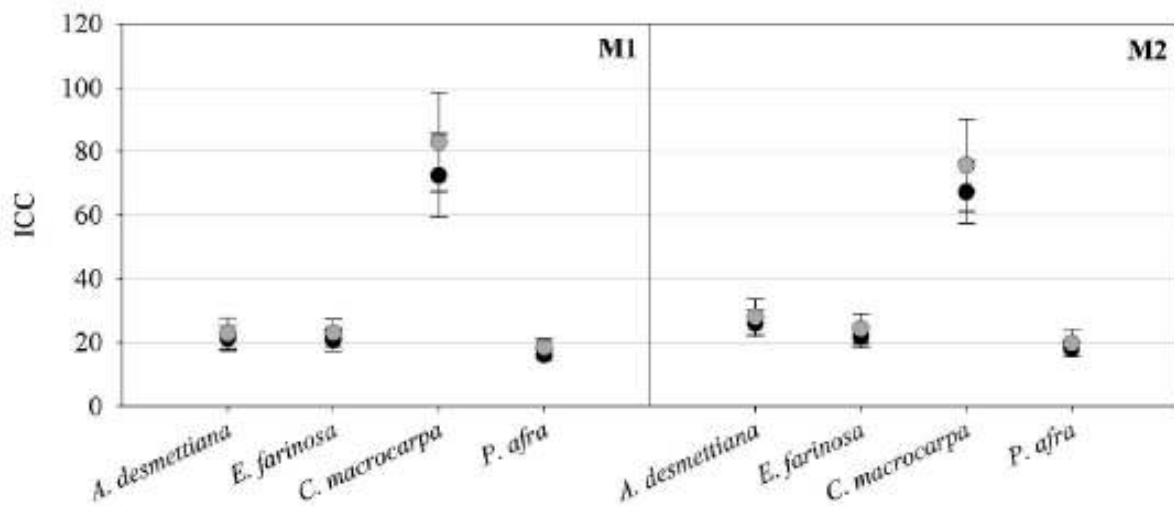


Figura 11. Índice de contenido de clorofila (ICC) por especie en todo el periodo experimental en ambos modelos (M1 y M2). Los puntos negros representan la media \pm desviación estándar de mediciones por la mañana y los grises la de mediodía.

VII. 5. 4. Temperatura dentro de los modelos experimentales

Los cursos diarios de temperatura indican una diferenciación entre los modelos, el control y la temperatura ambiente. Claramente se observó que, a partir de horas tempranas en el día, la temperatura interna de M1 y M2 permaneció relativamente menor a la de C y TA hasta horas del atardecer. Revisando gráficas individuales de variación diurna de temperatura (se ejemplifica con dos días: Figuras 13 y 14) se pudo observar el mismo comportamiento que se observa en la Figura 12.

En general se observó que durante la noche y parte de la mañana la temperatura interna de M1 y M2 fue mayor a la del control, con una diferencia máxima de promedios 1.69 (en M1) y 1.03 ° C. (en M2). Aproximadamente a partir de las 9 a. m. empieza a ocurrir lo contrario; la temperatura de los modelos se conserva menor a la del control, llegando a una diferencia máxima promedio de 2.56 (en M1) y 3.39° C (en M2); estas se alcanzaron aproximadamente al mediodía (entre 12 y 1 p. m.). Entre 5 y 6 p. m. la temperatura en el control se hace menor que la de los modelos (Figura 15).

Las diferencias entre TA y los modelos siguieron un patrón similar al descrito anteriormente. Durante la noche se notó que M1 tuvo una temperatura mayor a la ambiental, mientras M2 tendió a igualarse con TA. Las diferencias máximas de promedios en la noche fueron de 0.64 y 0.07° C. para M1 y M2 respectivamente. Entre las 6 y 7 a.m. la temperatura en los modelos se empezó a mantener menor que la ambiente, llegando a una diferencia máxima de promedios de 2.48 y 2.97° C. para M1 y M2 respectivamente, la cual se alcanzó entre las 10 y 11 a. m. A partir de las 4 p. m. aproximadamente la temperatura en M1 incrementó sobre la ambiental, mientras en M2 permaneció relativamente menor, con una diferencia nocturna muy cercana a cero, es decir, casi igual a la ambiente (Figura 16).

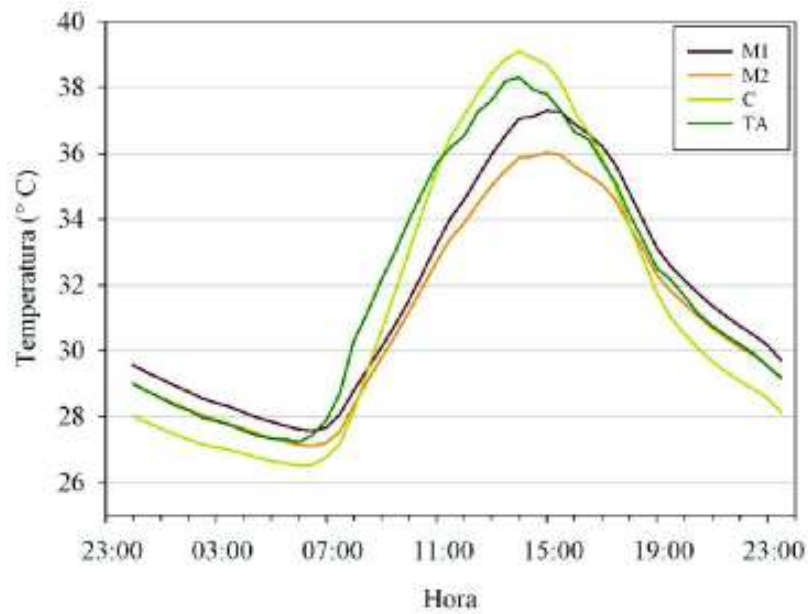


Figura 12. Variación diaria de los promedios por hora de registro de la temperatura ambiente (TA), la temperatura interna de los modelos experimentales (M1 y M2) y la temperatura dentro del control (C), durante el periodo experimental.

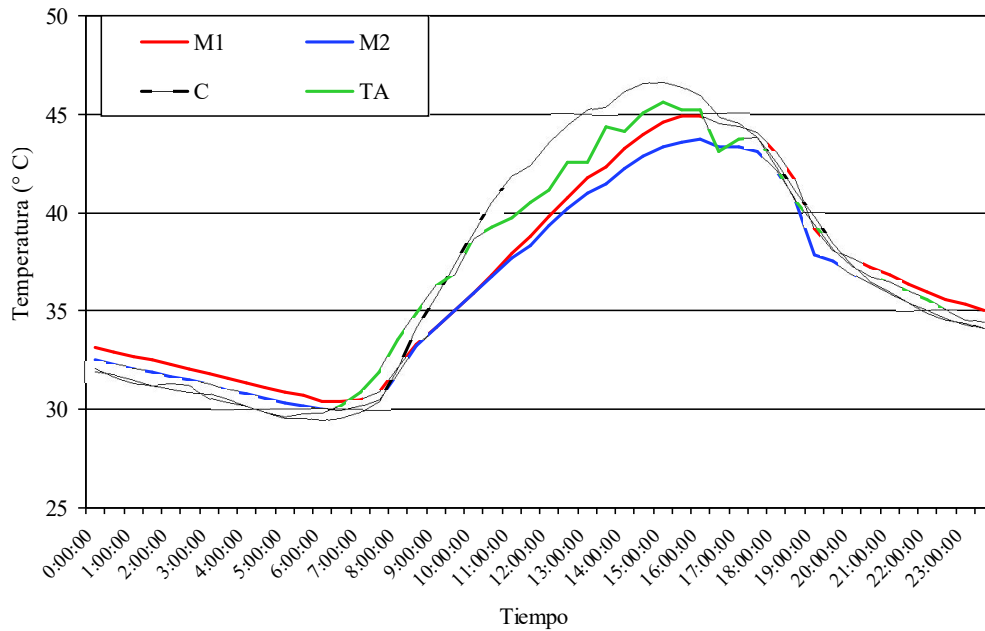


Figura 13. Curso de temperaturas correspondientes a un día totalmente soleado (14 de agosto 2015). Se muestra la temperatura de los modelos (M1 y M2), el control (C) y ambiente (TA).

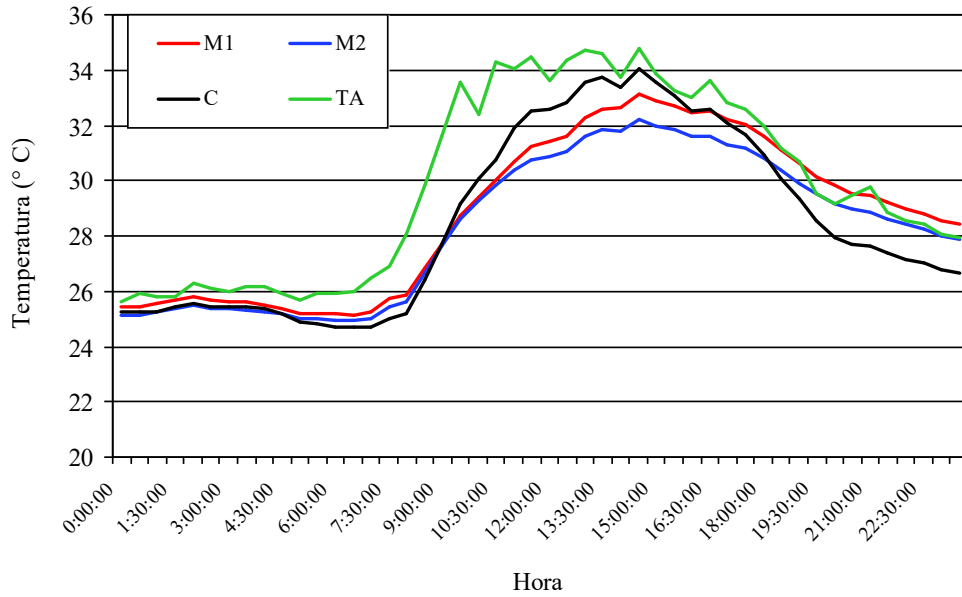


Figura 14. Curso de temperaturas correspondientes a un día semi nublado (9 de septiembre 2015). Se muestra la temperatura de los modelos (M1 y M2), el control (C) y ambiente (TA).

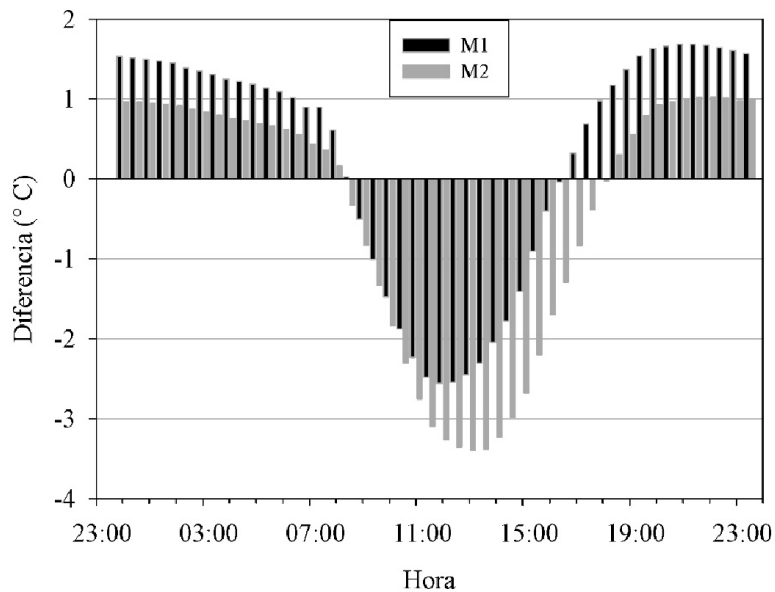


Figura 15. Diferencias de los promedios horarios entre los modelos experimentales (M1 y M2) y el control. Las diferencias negativas indican que los modelos se mantuvieron a menor temperatura que el control y las positivas lo contrario.

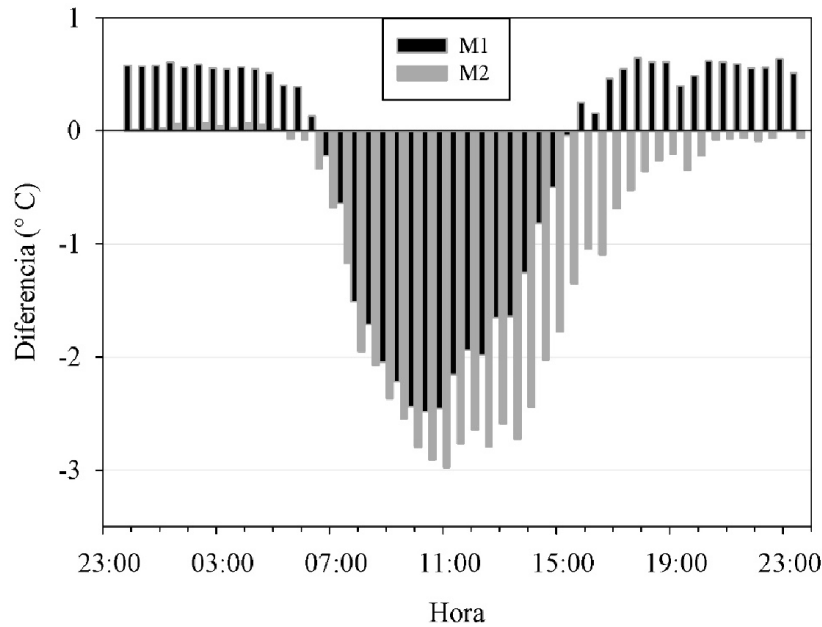


Figura 16. Diferencias de los promedios horarios entre los modelos experimentales (M1 y M2) y la temperatura ambiente (TA). Las diferencias negativas indican que los modelos llegaron a menor temperatura que TA y las positivas lo contrario.

La magnitud de diferencias no fue constante en horas diurnas; existió un aumento gradual desde la mañana hasta mediodía, donde se alcanzó la temperatura máxima en todos los casos, y una diferencia máxima también, después siguió un descenso gradual de las diferencias. Estos resultados indican que el efecto máximo de los modelos experimentales se dio a la mitad del día. Es decir, fue al mediodía cuando se dieron las diferencias de temperatura máximas, siendo menor la temperatura interior en los modelos, comparados con TA y C. Según los promedios horarios se puede deducir que este fue un patrón registrado en la mayoría de los días.

VII. 5. 5. Temperatura en la zona ajardinada de los modelos experimentales

La temperatura a aproximadamente 10 cm sobre el sustrato de los modelos también se diferenció de la ambiental, pero no de la misma forma que lo hizo comparado con el interior de los modelos experimentales. El resultado muestra que durante las horas diurnas ocurre un aumento de

temperatura dentro de los módulos que supera a la ambiental. Por la tarde y noche ocurre lo contrario, pero no con la misma magnitud. Revisando gráficas individuales de temperaturas se confirma el mismo patrón que se muestra en la Figura 17. Se puede concluir que la temperatura sobre el sustrato sigue un patrón de variación muy similar al de la temperatura ambiente, pero ocurre un aumento evidente en la zona ajardinada (Figura 17)

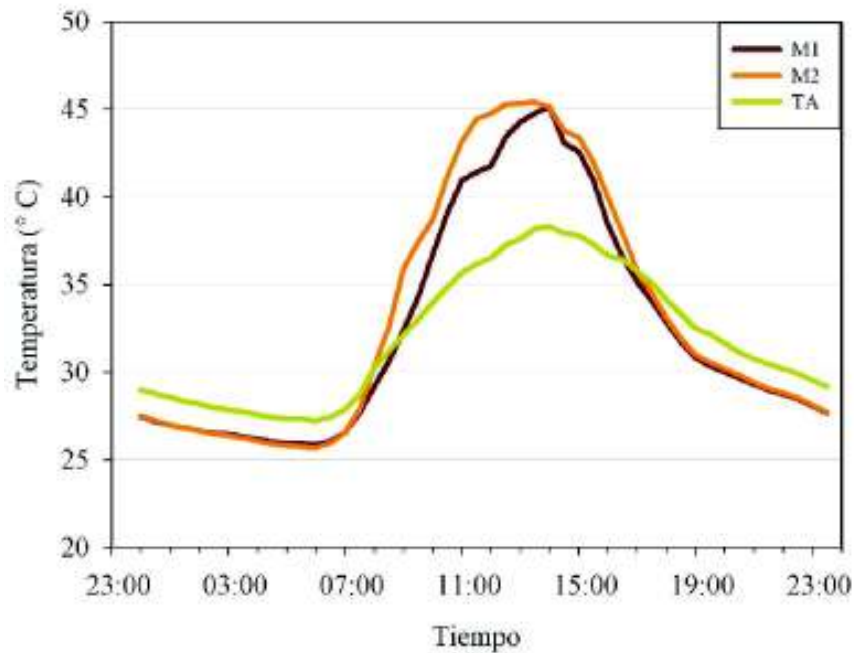


Figura 17. Curvas diurnas de promedios horarios de las temperaturas ambiente (TA) y a ~10 cm sobre el sustrato de módulos de los modelos experimentales (M1 y M2).

La magnitud de las diferencias entre TA y los modelos experimentales muestra que durante las horas nocturnas la temperatura sobre el sustrato permaneció relativamente constante, siendo menor a la TA, con una diferencia máxima de promedios de 1.64 y 1.61° C en M1 y M2 respectivamente; tal resultado se dio entre 7 y 8 p.m. aproximadamente. De 8 a 9 a.m. se empezaron a registrar las diferencias positivas en ambos modelos (los modelos se mantienen más calientes que la TA), llegando a una máxima de 6.82 y 8.28° C para M1 y M2 respectivamente, correspondientes al mediodía (Figura 18).

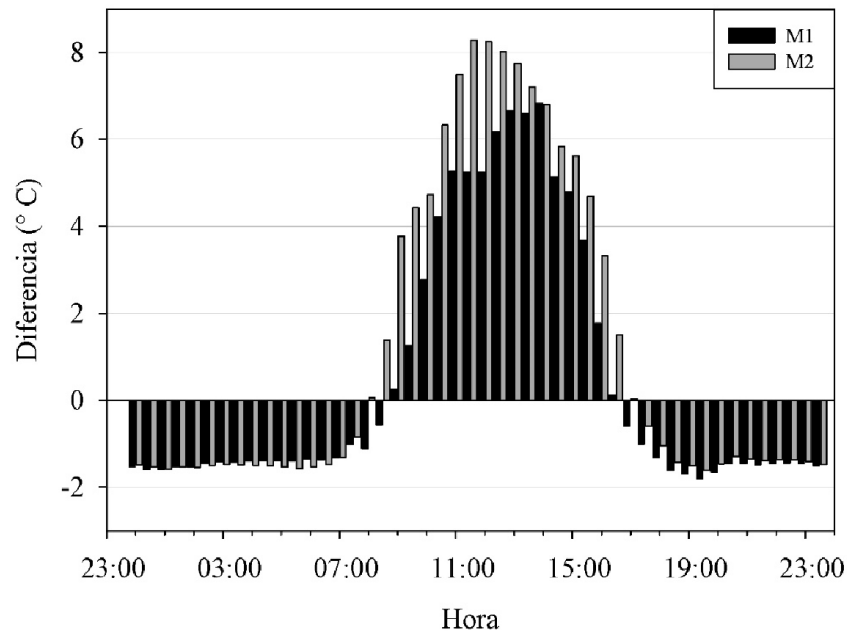


Figura 18. Diferencias de promedios horarios entre la temperatura ambiente y la temperatura a ~10 cm sobre la capa de sustrato entre plantas, en ambos modelos experimentales (M1 y M2). Las diferencias positivas indican que la temperatura de los modelos fue mayor que TA y las negativas lo contrario.

VII. 5. 6. Comparación de temperaturas entre los modelos experimentales y un techo convencional

Las temperaturas a distancia, tomadas con el termómetro infrarrojo sobre el dosel de la cubierta ajardinada (TS), fueron menores a las del techo convencional. En la mayoría de los casos no hubo diferencias significativas entre los modelos, pero sí entre los modelos y el techo, el cual generalmente tuvo en promedio temperaturas mayores. Las máximas registradas para los tres casos correspondieron al día 31 de Agosto, a las 2 p. m.; a esta hora se registró una temperatura ambiente de 42.63° C, con cielo despejado. Las mínimas correspondieron al 3 de septiembre, con TA de 27.96° C y fue un día lluvioso. Se puede notar que las temperaturas a ~10 cm sobre el sustrato son mayores a las del dosel, además, en ciertos casos no se alejan mucho de la del techo convencional (Tabla XVII).

La diferencia significativa entre modelos y el techo convencional da indicios del funcionamiento esperado de un techo verde. Las cubiertas ajardinadas, en comparación con una cubierta ordinaria de techo (en este caso color blanco), se encontraron generalmente a menor temperatura. Tal resultado podría repercutir positivamente en la transmisión de calor a través de la cubierta, provocando menos calor en el interior del espacio que cubriría un techo verde, además de la emisión de calor hacia el aire externo circundante.

Tabla XVII. Promedios por hora de medición de temperatura sobre modelos experimentales (M1 y M2) y el techo convencional. También se incluyen las temperaturas a ~10 cm sobre el sustrato registradas a esos tiempos. Superíndices diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$), iguales lo contrario.

Día/hora	Temperatura (° C)				
	~10 M1	~10 M2	M1	M2	Techo
21-Ago / 2 p. m.	42.46	42.87	40.3 ± 1.41 ^a	38.7 ± 1.21 ^a	49.1 ± 0.60 ^b
24-Ago / 10 a. m.	41.43	44.23	41.43 ± 1.62 ^a	43.03 ± 3.15 ^a	46.63 ± 1.18 ^a
24-Ago / 2 p. m.	54.28	54.21	44.56 ± 0.66 ^a	44.43 ± 3.87 ^a	53.76 ± 0.58 ^b
25-Ago / 10 a. m.	33.79	36.84	28.66 ± 0.11 ^a	27.13 ± 0.41 ^b	34.2 ± 0.45 ^c
25-Ago / 2 p. m.	47.32	46.24	39 ± 0.36 ^a	38.43 ± 0.90 ^a	53.93 ± 1.15 ^b
27-Ago / 10 a. m.	32.54	33.79	28.93 ± 0.30 ^a	28.56 ± 0.51 ^a	32.16 ± 0.66 ^b
27-Ago / 2 p. m.	51.58	50.66	41.16 ± 3.01 ^a	45.16 ± 3.03 ^a	54.63 ± 0.83 ^b
31-Ago / 10 a. m.	44.74	46.65	39.1 ± 2.06 ^a	40.16 ± 0.15 ^{a,c}	43.06 ± 0.90 ^{b,c}
31-Ago / 2 p. m.	54.59	54.73	50.56 ± 5.31 ^a	50.96 ± 2.79 ^b	56.33 ± 1.36 ^c
1-Sep / 10 a. m.	36.69	39.31	30.76 ± 3.10 ^a	32.76 ± 0.86 ^a	39.33 ± 0.45 ^b
1-Sep / 2 p. m.	50.04	46.73	34.16 ± 1.06 ^a	34.06 ± 1.15 ^a	52.53 ± 0.55 ^b
3-Sep / 2 p. m.	29.35	30.71	23.4 ± 0.02 ^a	24.9 ± 1.3 ^a	31.56 ± 0.70 ^b
7-Sep / 10 a. m.	41.04	45.45	33.96 ± 3.12 ^a	33.16 ± 0.51 ^a	44.1 ± 0.34 ^b
7-Sep / 2 p. m.	49.83	49.79	42.86 ± 0.80 ^a	35.93 ± 4.40 ^b	55.8 ± 0.85 ^c

VII. 5. 7. Relación entre humedad del sustrato y temperatura sobre la cubierta ajardinada

Se hicieron análisis de regresión lineal múltiple para evaluar el nivel de correlación de la temperatura a nivel del dosel (TS; datos de la Tabla XVII) con la humedad del sustrato, a aproximadamente las mismas horas (8 a. m. y 12 p. m.), y la temperatura ambiente.

Los resultados indican una relación lineal significativa con la humedad del sustrato. Se puede decir que aproximadamente el 60% del total de la variación de la temperatura superficial, en ambos modelos, se explica mediante una relación lineal con TA y % de θ_v del sustrato. Por otro lado, al evaluar cada regresor, se encontró que tan solo TA podría no ser útil para predecir la temperatura superficial a nivel del dosel (TS). En cambio, los datos ofrecen suficiente evidencia para concluir que el porcentaje de θ_v contribuye significativamente en la variación de TS, y podría ser más útil en la predicción (Tabla XVIII).

Estos resultados podrían indicar una importante influencia de la humedad sobre la emisión de calor de la cubierta ajardinada. Es decir, según lo observado aquí, cuando el nivel de humedad del sustrato fue alto se dio una temperatura menor de la cubierta en general (tomando en cuenta tanto el sustrato como las plantas, es decir la TS). Por otro lado, con un nivel bajo de agua en el medio de crecimiento se puede esperar una mayor temperatura. No se descarta el hecho de que TS no esté en relación con TA, pero se puede afirmar que, una forma de controlar la TS sería aplicar riego o mantener el sustrato húmedo de alguna forma.

Tabla XVIII. Ecuaciones de regresión lineal múltiple, coeficientes de determinación múltiple con valores F y valores t para cada regresor; subíndices de x y t se refieren a los regresores: “1” al arcoseno de % de θ_v y “2” a la temperatura ambiente; “*” indica $p < 0.05$.

Modelo	Ecuación	$R^2_{y.12}$	F	t_1	t_2
M1	$y = 28.51 - (0.54x_1) + (0.60x_2)$	0.63	9.66*	-2.37*	2.18
M2	$y = 32.41 - (0.59x_1) + (0.53x_2)$	0.61	8.80*	-2.50*	1.83

VII. 5. 8. Contenido de agua en los sustratos

La humedad entre ambos sustratos siguió un patrón similar al observado en el experimento con macetas sin plantas. Durante el periodo experimental se detectó que en 14 puntos de muestreo se dieron diferencias significativas entre la humedad de ambos sustratos, en los 22 restantes no. En una vista general la curva de promedios de M1 se mantuvo sobre la de M2 durante la mayor parte del muestreo (Figura 19).

El contenido de agua varió durante el periodo experimental principalmente por la alternancia de eventos de lluvia (los cuales fueron nueve) y periodos secos. Observando la figura 19 se puede notar que durante la segunda mitad del muestreo hubo más precipitación (a partir del tercer evento de lluvia aproximadamente), además, las curvas oscilan sin que se registre un punto tan bajo como en la primera mitad del muestreo. Otra observación importante fue que durante ese periodo lluvioso se registraron más diferencias significativas, en comparación con la primera mitad del periodo experimental. Durante el experimento se registraron en total 125.9 mm de precipitación (datos obtenidos de la estación ERNO de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos de la UNAM).

Gracias a las abundantes lluvias prácticamente no hubo necesidad de riego. Cuando se registraron los valores más bajos de humedad (~5 %) en ambos sustratos se aplicó riego (8 litros por módulo), aunque esos mismos días llovió momentos después de haber regado. Esto ocurrió dos veces durante el periodo experimental.

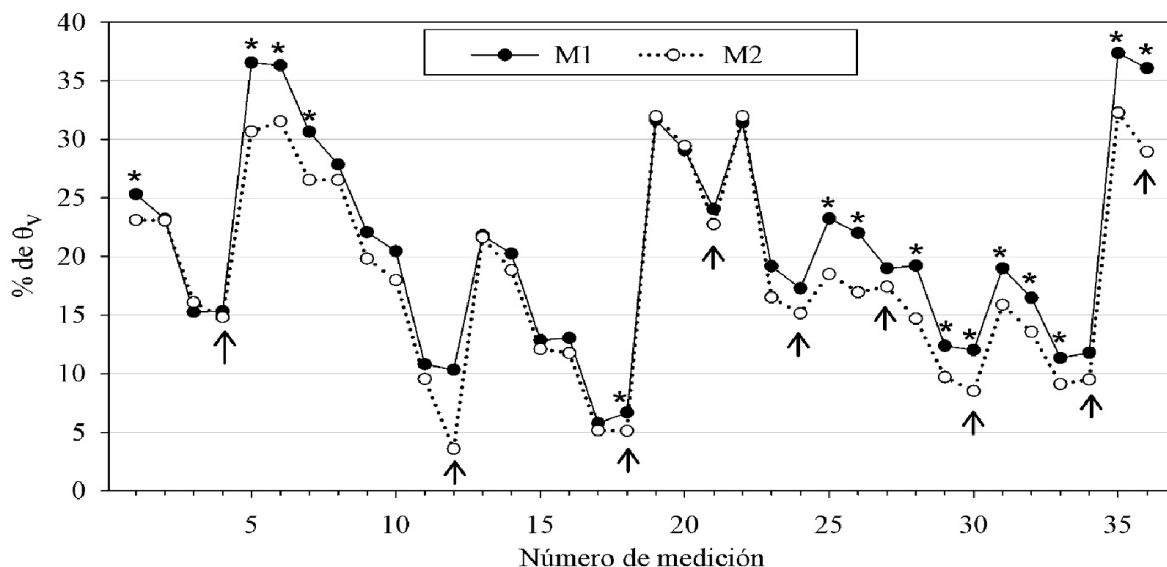


Figura 19. Cambios de humedad en el sustrato de cada modelo experimental (M1 y M2) durante el todo el periodo de muestreo. Cada punto representa un promedio de $n=5$. “*” indican diferencia significativa ($p<0.05$) entre ese par de puntos. Flechas indican eventos de lluvia próximos o en ese tiempo de medición.

VII. 5. 9. Crecimiento de las plantas

En general se observó crecimiento de pocos centímetros en la mayoría de las especies en ambos sustratos. En el caso de carisa se detectaron diferencias negativas entre los valores finales e iniciales. Esto seguramente se debió a la pérdida de hojas que sufrieron algunos individuos debido a una baja cantidad de agua en el sustrato; como se mencionó, no fueron reemplazadas y además se midieron y se tomaron en cuenta estos valores (Tabla XIX).

En ningún caso se detectó diferencia significativa entre los modelos experimentales (valor inicial vs. valor inicial y final vs. final), con lo que se puede concluir que, entre sustratos, la cobertura y altura inicial de las plantas de la misma especie fue similar, al igual que los valores finales (Tabla XIX). Se puede concluir que no hubo influencia del tipo de sustrato en el crecimiento.

Tabla XIX. Altura y área de copa (AC) de las especies en sus respectivos modelos experimentales (M1 y M2). Se presentan los resultados iniciales y finales; “ Δ ” es el valor final menos el inicial.

	Altura (cm)	Δ	AC (cm ²)	Δ
<i>A. desmettiana</i> M1				
Inicial	29.7	0.5	45.11	2.46
Final	30.2		47.58	
<i>A. desmettiana</i> M2				
Inicial	27.4	1	55.14	11.28
Final	28.4		66.43	
<i>E. farinosa</i> M1				
Inicial	28.7	3.3	25.92	10.27
Final	32		36.20	
<i>E. farinosa</i> M2				
Inicial	27.8	6.3	39.53	4.27
Final	34.1		44.25	
<i>C. macrocarpa</i> M1				
Inicial	15.9	-1	43.91	-1.9
Final	14.9		42.00	
<i>C. macrocarpa</i> M2				
Inicial	16.1	-1	39.81	-1.66
Final	15.1		38.14	
<i>P. afra</i> M1				
Inicial	41.9	2.2	80.54	39.33
Final	44.1		119.88	
<i>P. afra</i> M2				
Inicial	49.4	1.5	103.45	62.99
Final	50.9		166.45	

VIII. DISCUSIÓN

VIII. 1. Variación de Características Físicas de los Sustratos y su Relación con su Contenido y Dinámica de Humedad

Las características deseadas para el sustrato de un techo verde son baja densidad, alta porosidad y alta capacidad de retención de agua (CRA) (Graceson et al., 2014). Se busca una alta CRA por sus beneficios en el desarrollo vegetal, pues se ha demostrado que la vida de plantas se alarga en medios altamente retentivos (Farrell et al., 2012). Entre los sustratos probados hubo diferencias significativas en la CRA. Esta propiedad mejoró significativamente con la alta proporción de vermiculita y turba. S1 fue el sustrato que tuvo la mayor proporción de elementos con los valores más altos de CRA, como son la turba y la vermiculita; mientras que en S2 la adición de tezontle incrementó la porosidad, pero disminuyó el valor de CRA (Tabla X). Es interesante observar que estos sustratos tuvieron los valores más bajos de densidad aparente (Tabla X), lo cual pudo haberse debido a la alta proporción de elementos ligeros: vermiculita, turba y tezontle (Tabla IX). Los resultados indican que, con los componentes aquí utilizados, una forma de aumentar la CRA y al mismo tiempo disminuir la densidad aparente, es aumentar la proporción de elementos con esas mismas características, es decir, con alta CRA y simultáneamente ligeros. Esta propuesta se confirma si se comparan las características entre S1 y S4 (Tabla VI), ambas tuvieron los mismos componentes, pero S4 tuvo una proporción más baja de elementos con alta CRA y es por ello que tuvo baja retención de agua. Nektarios et al. (2003) demostraron que con tan solo una combinación de turba de *Sphagnum* y una resina de urea formaldehído (proporción 60:40) se obtuvo una mezcla de baja densidad y alta retención de agua, con diferencias significativas en comparación con otras mezclas; además, arena sola tuvo valores significativamente menores de retención de agua y mayor densidad, comparado con una combinación de arena, turba y perlita (50:30:20). Berreta et al. (2014) atribuyen una alta CRA al mayor contenido de materia orgánica en un sustrato para techo verde, aunque usualmente la materia orgánica no es usada como el componente principal de los techos verdes (Graceson et al., 2014). Nagase y Dunnett (2011) recomiendan que, a pesar de que una alta proporción de materia orgánica (hasta 50% del volumen) mejore la CRA debe tenerse especial

cuidado, pues pueden surgir algunos inconvenientes, como la lixiviación de nutrientes, un alto peso a saturación, la tasa de descomposición y consecuente pérdida de estructura del sustrato; concluyen que lo mejor no es una alta proporción de materia orgánica, sino una óptima (lo que puede ser una proporción relativamente baja) para el desarrollo vegetal, atendiendo las necesidades de recursos para cada especie.

Se han reportado varios estudios de las características de diversos componentes que pueden ser utilizados en techos verdes por ser ligeros y tener alta retención de agua. La vermiculita es un material sintético caracterizado como aditivo de sustratos por su alta retención de agua y ligereza (Hernández-Godínez y Jiménez-González, 2003). Probando diferentes componentes y mezclas de diferente proporción, Vijayaraghavan y Raja (2014) determinaron que la vermiculita por sí sola tuvo la mayor CRA (62.5%), seguido de turba de coco (46%), la cual tuvo la menor densidad; otro componente estudiado y que coincide con este trabajo fue la arena, a la que se le atribuyó la propiedad de proveer estabilidad en el sustrato; determinaron también que algunas de las mezclas con mayor CRA fueron aquellas con un 30% de vermiculita. Para un techo verde se recomienda el uso y alta proporción de componentes inorgánicos, pues se afirma que son física y químicamente estables, además de proveer las características deseadas para un techo verde y, entre otras cosas, minerales importantes para el desarrollo vegetal (Graceson et al., 2014). En este contexto la vermiculita sería un buen candidato para su uso en techos verdes, debido a su capacidad de retención de agua, su ligereza y capacidad de intercambio catiónico, aunque debe considerarse su precio y disponibilidad en el mercado local.

La porosidad del sustrato pudo haber tenido un papel importante en las características de retención de agua entre los sustratos de prueba. Se ha encontrado que una alta porosidad coincide con una baja CRA y viceversa (Graceson et al., 2014). En el presente trabajo se encontró un patrón similar (Tabla X). El espacio poroso funge como almacén de agua, además provee de oxígeno a las raíces. Sonaría lógico que alta porosidad significara más espacio para el agua y por consecuencia incrementaría la CRA, pero debe considerarse el tamaño de los poros. Poros muy pequeños (característica de suelos arcillosos) permiten mayor retención de agua gracias a las características físicas de adhesión y cohesión; poros grandes (característica de suelos arenosos) facilitarían la infiltración y percolación, dificultando la retención en el espacio entre partículas de suelo (Osman, 2013). En este contexto podríamos pensar que S1, aunque tuvo menos espacio poroso, sus poros pudieron haber sido más pequeños en comparación con S2,

que tuvo más espacio poroso, pero menos CRA, lo que indicaría que el agua pudo haber escapado fácilmente. Quizá el tezontle, por su gran diámetro de poro, confirió un espacio más amplio entre las partículas de suelo en S2. La vermiculita, por su forma aplanada y de acordeón, además por ser más pequeña que el tezontle, pudo haber disminuido el espacio y tamaño de poros, facilitando la retención de agua en S1, además, por sí sola la vermiculita tiene alta CRA.

Las características de los suelos pueden tener importantes implicaciones en el contexto de sustratos destinados a techos verdes. Un suelo muy poroso permite la rápida infiltración de agua, evitando escurrimiento superficial, encharcamiento y ocuparía riego más seguido, pero permite un mejor desarrollo de raíces. Un suelo arcilloso ocuparía menos riego, aunque dificultaría el desarrollo y aireación de raíces, además la infiltración sería más lenta, lo que provocaría encharcamiento (Osman, 2013). Por lo general, para techos verdes, se recomienda evitar la escurrimiento y encharcamiento, pero que al mismo tiempo se logre alta retención de agua, además de baja densidad; esto generalmente es una tarea difícil de lograr. La combinación de elementos que confieran ese tipo de propiedades podría ayudar en el desarrollo de mejores sustratos para techos verdes. Según las propiedades observadas en los componentes y sustratos utilizados en este trabajo, con tan solo una combinación de tezontle y vermiculita se lograría obtener las propiedades buscadas: ambos son ligeros y porosos, aunque difieran en CRA, el segundo podría ejercer el papel retentivo; junto con la adición de materia orgánica (turba en el caso del presente trabajo) mejoraría la CRA, densidad y desarrollo vegetal.

VIII. 1. 1. Pérdida de humedad entre sustratos

En el tiempo la humedad entre los sustratos de prueba no fue marcadamente diferente; la dispersión alrededor de la media en mediciones de humedad fue grande. El solapamiento de intervalos de confianza y pruebas *t* indicaron una diferencia no significativa en la mayor parte de los experimentos con macetas (con y sin plantas). Aunque algunas evidencias podrían indicar que hubo cierta inclinación en S1 por conservar más agua que S2, como: la diferencia significativa de la CRA, la diferenciación de curvas de los datos crudos de los sensores TMS

(Figura 5) y el valor aislado de las medias en el experimento con macetas sin plantas (Figura 4) y en los modelos experimentales (Figura 19).

Las curvas de humedad entre modelos experimentales de este estudio sugieren que durante un periodo lluvioso las diferencias significativas se mantienen y en un periodo seco las diferencias no son tan marcadas. La segunda mitad del periodo experimental fue más húmeda que la primera. En la Figura 19 se puede observar que a partir del tercer evento de precipitación la humedad no cae repentinamente y se dan más diferencias significativas. Entre la primera y segunda lluvia evidentemente hubo un periodo más seco, en el que la humedad cae de forma más directa y se dan pocas diferencias significativas. Esto nos dirige a pensar que cuando las condiciones ambientales permitan mantener un nivel moderado de humedad, y además aproximadamente constante, las diferencias significativas se dan. La vermiculita fue el componente que confirió alta CRA a S1, pero al exponerse a condiciones ambientales que provocan alta tasa evaporativa quizá esta propiedad se vea afectada, es decir, perdería agua rápidamente o no sería capaz de conservarla, haciendo que la humedad de S1 no se aleje mucho de S2. Cuando las condiciones ambientales son más frescas y húmedas (la tasa evaporativa no sería tan alta), quizá la vermiculita pueda conservar su propiedad retentiva, permitiendo que la humedad de S1 sea lo suficientemente alta como para dar significancia en la diferencia con S2. La vermiculita en este caso sería buena para retener agua pero no para impedir su pérdida por evaporación. Esta explicación podría ser válida para explicar las pocas diferencias significativas en los experimentos de humedad sin y con plantas. El análisis para confirmar esta propuesta es un tema que puede retomarse en futuras investigaciones. Con esta teoría se concluiría que una alta CRA no asegura que a la intemperie se conserve siempre mayor humedad, al menos con los sustratos aquí probados y bajo un clima cálido y seco.

La tasa de transpiración de las plantas es otro factor importante en la disponibilidad de agua de los sustratos; diferencias entre modelos del índice de área foliar puede jugar un papel importante en el escape de agua por evapotranspiración, aunque en el presente trabajo se asume que las plantas de la misma especie tuvieron tasas de transpiración similares. En el experimento con macetas se procuró usar plantas del mismo tamaño por especie. Otro hecho que apoya la suposición anterior es la diferencia no significativa del tamaño inicial y final de las plantas entre modelos (Tabla XIX). Se considera que el crecimiento de las plantas fue similar en ambos

sustratos, al igual que los parámetros fisiológicos. Por esta información se concluye que los medios de crecimiento permitieron un desarrollo vegetal normal durante el experimento.

En algunos trabajos se ha estudiado el comportamiento del agua en el sustrato de techos verdes, donde los resultados coinciden con la presente tesis. La alta proporción de materia orgánica puede conferir una mayor retención de agua, además mayor conservación de agua en el tiempo, cuando el sustrato se deja secar (Nagase y Dunnett, 2011). Algo similar se comprueba cuando se combina turba de *Sphagnum* y perlita, en donde las curvas de liberación de agua de sustratos con estos aditivos se ubican sobre las de otras mezclas sin ellos, es decir, la liberación es más lenta (Nektarios et al., 2003). Berreta et al. (2014) demostraron que a pesar de que existan diferencias en la CRA (medida en el laboratorio) de sustratos, su desempeño a la intemperie en techos verdes dependió en buena medida de las condiciones climáticas en el tiempo. Los autores encontraron que durante una estación fresca la tasa de pérdida de humedad entre sustratos con diferente CRA no se diferenció mucho, lo cual cambió en verano, donde se dio más diferenciación. También encuentran un resultado muy similar al del presente trabajo, en donde en una estación relativamente fresca las curvas de contenido de humedad se diferencian claramente, mientras que en una estación más caliente las curvas terminan uniéndose. No encontraron mucha diferencia en el contenido de humedad de dos sustratos (con CRA: 41.2 % y 39.1 % respectivamente) durante periodos secos entre lluvias; los autores atribuyen esto al contenido de humedad inicial (máximo) en cada periodo de estudio. Si después de una lluvia los sustratos contenían mucha agua las curvas de humedad se diferenciaban claramente (la de mayor CRA sobre la de menor CRA todo el tiempo). Si la humedad inicial era media o baja (criterio de los autores) las curvas se encontraban más unidas.

La necesidad de regar los modelos experimentales fue poca, ya que fue un verano inusualmente lluvioso en Hermosillo, probablemente debido al evento de El Niño que inició en 2015. El mayor objetivo del riego es incrementar el potencial hídrico del sustrato (Vence, 2008). Un bajo potencial en el sustrato (suelo seco) afectaría rápidamente procesos fisiológicos, como la disminución del crecimiento, la reducción de la conductancia estomática y fotosíntesis de la hoja (Taiz y Zeiger, 2002). Al incrementar la CRA se podría mantener por más tiempo un alto potencial hídrico, con lo que el agua no sería tan limitante para las plantas, consecuentemente el desarrollo no se vería tan afectado, en comparación con un sustrato con baja CRA. Raimondo et al. (2015) demostraron que el potencial hídrico y el agua disponible para la planta aumentan

en un sustrato con alto contenido de agua a saturación, comparado con otro sustrato con bajo contenido a saturación, aunque esta propiedad no influyó significativamente en el crecimiento de dos especies mediterráneas cuando se compararon entre sustratos. Esto se realizó en una estación de verano bajo un clima mediterráneo. Otro modo de incrementar la humedad en el sustrato sería aumentando su profundidad, pues habría más espacio para la retención de agua e intercambio de nutrientes (Graceson et al., 2014), aunque esto incrementaría el peso del techo verde, lo que es un factor importante a considerar.

La alta CRA en todo caso sería benéfica para evitar o disminuir el riego del techo verde, haciendo más eficiente el uso de agua. Esta propiedad es especialmente conveniente en lugares donde la poca precipitación y la tasa de evaporación representan el principal problema de disponibilidad de agua en los suelos. Werthman (2008) analiza esta problemática, y afirma que en techos verdes bajo climas templados prácticamente no se utiliza la irrigación artificial, por otro lado, en lugares cálidos y secos, el riego podría definir el éxito y funcionamiento del sistema. Una manera de hacer eficiente el uso de agua es por medio del uso de plantas adaptadas a la sequía; otros métodos incluyen la recolección en cisternas y uso de agua de lluvia para regar durante la temporada seca, como en el techo del Tempe Transportation Center, o el uso del agua condensada de aparatos de refrigeración del aire, como se hace en un techo verde de San Diego, CA. A pesar de esto, es discutible el destinar el agua almacenada para riego o para necesidades humanas básicas, además, si se disminuye el uso del aire acondicionado por el efecto refrescante del techo verde, el agua condensada sería limitada. El mismo autor concluye que es conveniente la irrigación de techos verdes en climas cálidos y secos, esto en el contexto de funcionalidad, pues refrescarían el ambiente por medio de evapotranspiración, una afirmación que coincide con lo observado en el presente trabajo, además aseguraría la sobrevivencia de plantas.

VIII. 2. Estrés de las Plantas en Condiciones de Techo Verde

Por la mañana generalmente se observaron valores de F_v/F_m alrededor de 0.80 en todas las especies en ambos modelos experimentales (Figura 10). Estos valores representan el máximo bajo condiciones fisiológicas normales y sin exposición a estrés; en general para plantas C3 y

CAM el valor óptimo está entre 0.78 y 0.87. Por la mañana las condiciones de luz y temperatura no son tan estresantes, las temperaturas son bajas y hay poca incidencia de radiación solar (RFA en este caso). Estas condiciones, en un contexto fotoquímico, dan lugar a la oxidación (o relajación) de los centros de reacción del fotosistema II, en donde se considera que la eficiencia de transferencia de energía, entre los pigmentos antena y los centros de reacción, es máxima. Conforme aumenta la intensidad de luz se espera que el valor de F_v/F_m baje, presentándose fotoinhibición (Adams III et al., 2008).

Se puede entender la fotoinhibición como procesos moleculares que inhiben la fotosíntesis (evolución del oxígeno y transporte de electrones a través del PSII) debido a la alta intensidad de radiación fotosintéticamente activa (RFA). La luz en exceso puede causar daño molecular, además, si no se disipa de forma segura se pueden generar especies reactivas o tóxicas, como el estado triplete de la clorofila, superóxido, oxígeno singlete, peróxido de hidrógeno y radical hidroxilo. La planta puede entrar en fotoinhibición como consecuencia de la producción y daño causado al PSII por esos compuestos (Taiz y Zeiger, 2002; Murata et al., 2007). Específicamente resulta afectada la proteína D1 del centro de reacción del PSII; a pesar de esto, dicha molécula es degradada y vuelve a sintetizarse, con lo que la planta puede volver a su estado fotosintético normal, aunque las temperaturas extremas, la alta salinidad y sequía son algunos factores que retardan tal reparación (Murata et al., 2008; Takahashi y Murata, 2008).

La caída de los valores de F_v/F_m observados al mediodía se explicaría por el aumento de radiación y temperatura a esas horas del día (Figura 10). Los coeficientes de correlación indicaron que a medida que aumentaba la radiación y temperatura el valor de F_v/F_m tendía a decrecer en las cuatro especies probadas en el presente trabajo. Sin embargo, la respuesta fue diferencial, observándose que algunas especies tuvieron una menor disminución en comparación con otras. Se ha reportado que el nicho ecológico, forma de vida, características genotípicas y fisiológicas de las especies pueden estar relacionadas con esta sensibilidad diferencial (Adams et al., 2008).

Carisa macrocarpa fue la que tuvo valores más bajos del parámetro de fluorescencia, muy cercanos o iguales a cero por varios días al mediodía. Valores del parámetro entre 0.1 y 0.2 indican fuerte fotoinhibición; bajo tal circunstancia la actividad fotoquímica se inactiva y gran parte de la energía solar captada por la clorofila es convertida a calor (proceso referido también como temple no fotoquímico de la fluorescencia [NPQ por sus siglas en inglés]), mediante la

síntesis de las xantofilas (carotenoides), zeaxantina (Z) y anteroxantina (A), que ocurre en el ciclo de las xantofilas (mecanismo fotoprotector) (Adams et al., 2008). Demig-Adams y Adams III (1996) comprobaron que la disminución de la eficiencia del PSII se correlaciona con una alta concentración de xantofilas a altas intensidades de luz. El daño molecular causado por las especies reactivas reduce la tasa fotosintética, activándose como consecuencia la fotoprotección (Taiz y Zeiger, 2002). Se ha demostrado que cuando $F_v/F_m = 0$ aún existe un pequeño porcentaje de centros de reacción listos para el transporte de electrones (Giovagnetti y Ruban, 2015), lo que indicaría que la actividad fotosintética no se inhibe totalmente con valores tan bajos de F_v/F_m .

Las demás especies estudiadas tuvieron un menor decremento de F_v/F_m al mediodía, lo que sugiere una fotoinhibición moderada. Adams et al. (2008) consideran que se llega a tal estado cuando F_v/F_m es 0.4 – 0.7. Bajo esta circunstancia los niveles de Z y A son variables, por lo que la liberación de calor también varía con respecto a la intensidad de luz y otros factores que produzcan estrés. En este estado de fotoinhibición el daño causado al PSII no es tan grande como para que su reparación dure mucho tiempo.

Se afirma que existe una diferencia entre fotoinhibición y NPQ, aunque en general se refiere a ambos en conjunto dentro del concepto de fotoinhibición y se asocian en la regulación de la actividad fotosintética. El primero se refiere al daño a largo plazo del centro de reacción del PSII (degradación de la proteína D1); mientras que NPQ también es un mecanismo reversible que protege al aparato fotosintético del exceso de luz (asociado con la síntesis de xantofilas). F_v/F_m es un parámetro que mide la actividad de ambos procesos en conjunto, y con otros parámetros de fluorescencia (que no se tomaron en el presente trabajo) se podría distinguir, de manera aislada, el efecto fotoprotector y el fotoinhibidor. Finalmente se refiere a fotoinhibición como un proceso conjunto y dinámico de daño y protección (Giovagnetti y Ruban, 2015).

Algunos días por la mañana *C. macrocarpa* mostró valores que indicarían un nivel moderado de fotoinhibición (figuras 8a y 9a). Esto podría indicar que la especie atravesó por fotoinhibición sostenida en algún tiempo del estudio. La fotoinhibición sostenida se caracteriza cuando F_v/F_m se mantiene en valores por debajo del óptimo, incluso si la luz no es excesiva, es decir, el bajo valor de F_v/F_m puede ser muy similar entre mañana, mediodía y tarde; simultáneamente los niveles de Z y A se mantienen altos, es decir, hay una constante y fuerte

tendencia al NPQ; este caso se presenta típicamente en especies perennes durante el invierno (pinos por ejemplo) y es una de las razones que explica la suspensión del crecimiento de las plantas durante la temporada fría (Adams et al., 2008; Demig-Adams et al., 2008). Las señales de Fv/Fm indican también que *C. macrocarpa* fue muy sensible a la luz y temperatura, es decir, fue más propensa a fotoinhibirse fuertemente, lo que indicaría que, de entre las cuatro, esta podría sufrir más daño y quizá a largo plazo en el PSII, resultando impedida de desarrollarse óptimamente.

Se considera que el resto de las especies presentaron fotoinhibición flexible, logrando recuperarse entre días. Se piensa así por sus valores altos y, relativamente, no tan variables de Fv/Fm por la mañana. La fotoinhibición flexible se presenta cuando Fv/Fm tiene valores óptimos o moderados (de 0.4 a 0.8 aproximadamente) bajo condiciones estresantes. En este caso los niveles de Z, A, y Fv/Fm no son constantes y es posible la recuperación de la actividad fotosintética normal cuando el estrés cesa, es decir, aunque se detecten valores moderados el regreso al valor óptimo ocurre en poco tiempo, en una magnitud de horas (Adams et al., 2008; Demig-Adams et al., 2008).

En el presente trabajo se probó la especie *Agave desmettiana*, la cual, por sus valores Fv/Fm tan altos, se asume que probablemente es una especie adaptada a la exposición solar. Virtualmente todos los agaves suculentos presentan metabolismo fotosintético CAM; este es un atributo que les ha permitido adaptarse a condiciones cálido-secas, otros son la suculencia de tejidos, un sistema radicular superficial, cutículas gruesas y estomas reducidos en tamaño y/o frecuencia (Matiz et al., 2013). Se han observado otros mecanismos involucrados en el funcionamiento bajo condiciones estresantes. Fondon et al., (2014) encontraron, en un estudio realizado en una zona desértica de NE de México, que *Agave striata* (CAM) tiene la propiedad de disminuir el nivel de fotoinhibición por medio de la generación de antocianinas y la síntesis de xantofilas. Se observó el aumento de estos compuestos de la mañana al mediodía y Fv/Fm se mantuvo en valores óptimos durante todo un día. Ellos concluyen que la antocianina (flavonoide encontrado en las vacuolas de algunas células foliares) podría reducir la transmitancia de luz a través de la hoja lo suficiente como para impedir la fotoinhibición.

La otra suculenta probada en este trabajo fue *Portulacaria afra*, una especie con un metabolismo descrito como CAM facultativo, en el que se pueden presentar características de C₃ y CAM según las condiciones ambientales. Se ha encontrado que bajo estrés hídrico

predomina el metabolismo CAM (cierre estomático diurno y alta fluctuación de ácido intracelular en el día). Es importante mencionar que la especie también cambia su metabolismo estacionalmente; en plantas irrigadas se observó en verano un típico comportamiento CAM, el resto del año fue C₃ (Guralnick et al., 1984). Se ha registrado que la especie atraviesa por mayor nivel de NPQ cuando es completamente CAM, comparado con un estado cíclico C₃/CAM, donde NPQ fue menor. Esta diferencia se le atribuye a la disponibilidad de CO₂ entre uno y otro estado; los autores sugieren que C₃/CAM tendría más disponibilidad, pues durante el día habrían dos fuentes de CO₂: el ácido málico y la atmósfera; mientras que en estado CAM solo tiene al ácido como fuente de CO₂ (Guralnick et al., 1991). Adams III et al. (1988) encontraron que *Hoya australis* (CAM) creciendo en condiciones naturales y a exposición solar total pasó por fuerte fotoinhibición al mediodía, recuperándose casi totalmente en horas de menos intensidad de luz; esta especie se comparó con una C₃ con mayor capacidad fotosintética, la cual mantuvo valores de Fv/Fm altos a la largo de un día a exposición solar total. Se considera que *P. afra* atravesó por fotoinhibición moderada al mediodía, y en un contexto temporal más amplio la fotoinhibición fue flexible.

Con la información anterior se puede pensar que el metabolismo CAM no necesariamente es un atributo que reduzca el nivel de fotoinhibición (daño y protección), como se pensaría observando el nivel de fotoinhibición de *A. desmettiana*. Otras propiedades pueden estar involucradas en la tolerancia hacia los efectos del exceso de luz, como la capacidad fotosintética y la adaptación y/o aclimatación a la exposición solar total (Adams et al., 2008), también la alta disponibilidad de agua y nutrientes en el medio de crecimiento reducen el nivel de fotoinhibición (Takahashi y Murata, 2008). En CAM el CO₂ producido a partir del ácido málico podría ser un factor que también prevenga la fotoinhibición (Adams III et al., 1988), pues la alta disponibilidad de CO₂ aceleraría su fijación, incrementando la actividad fotoquímica y disminuyendo el NPQ (recordar que son procesos competitivos entre sí) (Guralnick et al., 1991). La captación fotosintética de CO₂ también impide la formación de especies reactivas de oxígeno (Takahashi y Murata, 2008).

Encelia farinosa (C₃) atravesó por fotoinhibición moderada la mayor parte del muestreo, presentando solo en pocos días fotoinhibición fuerte; aunque se puede afirmar que también fue flexible, logrando recuperarse en la tarde/noche, ya que los valores en la mañana fueron altos. Al ser una especie adaptada al clima del Desierto Sonorense se espera que tenga mecanismos

que le permitan desarrollarse en intensidades altas de luz y temperatura. Por esta adaptación se considera que las respuestas de fotoinhibición observadas en este trabajo fueron normales. Las hojas de esta especie presentan alta pubescencia, con lo que pueden reflejar hasta el 70 % de RFA y el porcentaje de energía absorbida se reduce (Ehleringer et al., 1976, citado por Ehleringer y Bjorkman, 1978). Se puede pensar que la pubescencia confiere protección contra la fotoinhibición. Ehleringer y Bjorkman (1978) demostraron una correlación entre absorbancia y pubescencia de hojas en diferentes estaciones del año, en el Desierto Sonorense. En tiempos lluviosos se desarrollaban hojas con vellos muy dispersos y la absorbancia fue de 80%; en las estaciones secas se producían hojas con mucha vellosidad y la absorbancia decayó hasta en un 52%. La pubescencia varía conforme las condiciones ambientales y consecuentemente la energía de entrada a la hoja varía al mismo tiempo. El presente trabajo se realizó durante la estación lluviosa de verano, entonces se puede esperar que las hojas hayan presentado pubescencia ligera, como lo describen los autores anteriores. Por ser una estación de crecimiento se espera que la planta genere más biomasa, por lo tanto debería dejar entrar más energía para activar la fotosíntesis. Por lo observado en el presente trabajo, la cantidad de energía al mediodía fue tan excesiva como para fotoinhibir, pero la capacidad de recuperación entre días podría ser parte de las adaptaciones de esta especie al desierto. Estudiar las señales de fluorescencia según el nivel de pubescencia es un interesante tema de investigación con el que se podría conocer más acerca de los mecanismos adaptativos de *E. farinosa*.

La posición de las hojas es un factor que pudo haber generado variación de F_v/F_m . Se ha encontrado que al mediodía, a exposición solar total y en medio natural, la eficiencia del PSII puede ser óptima ($F_v/F_m \sim 0.8$) en hojas sombreadas por el mismo dosel; otras más expuestas experimentaron fotoinhibición con alta relación a la intensidad de luz; esto se encontró para *Euonymus kiautschovicus*, un arbusto exótico y siempreverde creciendo en la Universidad de Colorado, EUA (Demig-Adams y Adams III, 1996). Adams et al. (1987) encontraron variación del parámetro según la exposición de diferentes caras de los cladodios de *Opuntia basilaris*; por lo general las caras orientadas al sur (más expuestas en comparación con las caras que apuntaban hacia el norte) experimentaron mayor fotoinhibición. También determinaron que la cara de cladodios orientados al este experimentó una caída de F_v/F_m al mediodía, con un valor mínimo de 0.4 aproximadamente. Los valores del parámetro variaron conforme varió la densidad de flujo de fotones a lo largo del día, disminuyendo cuando aumentaba la luz. Encontraron además

que en el lugar de estudio (Death Valley, California), la especie no mostró $F_v/F_m > 0.6$, por lo que le atribuyeron fotoinhibición sostenida.

La poca significancia y debilidad de los coeficientes de correlación de F_v/F_m con la humedad del sustrato podría deberse a la rapidez de respuesta del parámetro hacia la luz. El estrés hídrico podría ser un factor que exacerbe la fotoinhibición, al igual que las altas temperaturas; en realidad los factores que en incremento provocan fotoinhibición no aceleran el daño molecular, sino que impiden la reparación (Takahashi y Murata, 2008). Los trabajos de Woo et al. (2008) y Curtis et al. (2014) (descritos en la sección de antecedentes) demuestran la variación del parámetro según condiciones cambiantes de humedad y temperatura respectivamente; estos se realizaron en ambientes controlados, donde la luz fue no influyó. Otro ejemplo es el de Adams et al. (1987), donde determinaron una caída de F_v/F_m de 0.78 a 0.62 en *O. basilaris*, después de 221 días de desecación dentro de un invernadero, bajo condiciones controladas. En muchos trabajos descritos en esta sección los cambios en la emisión de fluorescencia se estudian principalmente en relación con la luz, factor que activa la fotosíntesis.

Debe considerarse que en todas las especies del presente estudio se encontraron casos en los que la relación F_v/F_m vs % de θ_v fue significativa. *P. afra* la tuvo en ambos modelos experimentales (más fuerte en M2 que en M1); *C. macrocarpa* y *E. farinosa* en M2 (Tabla XIII) y *A. desmettiana* en S2 (experimento en macetas, Tabla XI). Se observa que en todas las especies la relación F_v/F_m y % de θ_v , creciendo en S2, fue significativa. Al no detectarse significancia en S1, se asume que en este sustrato la disponibilidad de agua en realidad pudo haber sido lo suficientemente alta como para no influir en gran medida sobre la variación de F_v/F_m , cuando al mismo tiempo influían la temperatura y radiación. A pesar de que no siempre se detectó diferencia significativa entre la humedad de ambos sustratos durante todo el muestreo de modelos, este resultado podría confirmar que el uso de S1 es más viable como medio de crecimiento para un techo verde, al menos para las especies aquí probadas.

VIII. 3.Variación del Contenido de Clorofila

La clorofila es el pigmento encargado de la cosecha de energía radiante y su conversión a energía química en el proceso de fotosíntesis. La cantidad de energía absorbida por la hoja depende de la cantidad de clorofila, así, bajo ciertas condiciones puede estar determinando la productividad de las plantas. La cantidad de clorofila y su variación se han relacionado con el estatus nutricional de las plantas (Lambers et al., 2008), ya que bajo déficit de nitrógeno la concentración de clorofila disminuye. También la disminución en el contenido de clorofila se ha relacionado con la senescencia y la exposición de las plantas a diferentes tipos de estrés, como temperaturas extremas, salinidad y estrés hídrico. Mohanty et al. (2006) observaron que la síntesis de clorofila se inhibe con muy altas y bajas temperaturas en plántulas de trigo y pepino. Bitá y Gerats (2013) analizan las posibles complicaciones del estrés por temperatura, mencionando que la degradación de clorofila puede llegar a afectar desde el crecimiento de la planta hasta su éxito reproductivo. Oguchi et al. (2003) demostraron un caso de plasticidad fotosintética, en el que los cambios en contenido de clorofila estuvieron influenciados por las condiciones luminosas; en donde el contenido de clorofila y nitrógeno, al igual que factores morfológicos, fueron modificados de un ambiente sombreado a uno luminoso. La deficiencia de nitrógeno se traduce en blanqueamiento de hojas y es de esperarse encontrar disminución en la concentración de clorofila (Hamblin et al., 2014). Muchos de los trabajos sobre variación en el contenido de clorofila se enfocan a especies cultivadas.

En el presente trabajo, aunque existió cierta variación de concentración de clorofila en las especies durante el experimento, no se piensa que haya sido tan grande como para considerar que el contenido de clorofila haya indicado estrés en la mayoría de las especies probadas. Por su poca variación y diferencia entre mañana y mediodía, se considera que la clorofila se mantuvo en niveles normales. Por especie no se observó gran variación del contenido de clorofila. *Encelia farinosa*, *Agave desmettiana* y *Portulacaria afra* tuvieron, en relación con *C. macrocarpa*, los niveles más bajos del pigmento (Figura 11). La constancia en los valores de clorofila podría ser indicio de un estado aclimatado de la planta hacia la irradiación alta (Hallik y Kull, 2008). De manera similar, Toscano et al. (2016) no encontraron gran variación en el contenido de clorofila *a* (Chl_a) y *b* (Chl_b) en dos especies, creciendo bajo estrés hídrico en condiciones controladas

durante un mes de prueba; Toscano et al. (2014) tampoco detectaron cambios en el contenido de clorofila de cinco especies ornamentales comunes en el mediterráneo, las cuales se expusieron a estrés hídrico; los autores proponen que quizá el tiempo de prueba no permitió observar un cambio significativo en el contenido de clorofila.

La única especie con correlación significativa entre el índice de contenido de clorofila (ICC) y los tres factores abióticos fue *Carisa macrocarpa*. Los coeficientes tuvieron valores que indican una relación positiva débil (alrededor de 0.5; Tabla XIV), por lo que se entiende que una pequeña parte de la variación y el incremento de la clorofila estarían explicados por el incremento de RFA, TA y % de θ_v . A pesar de que se observó una correlación negativa fuerte de Fv/Fm con TA y RFA, no se observó una disminución de la clorofila, lo que sería de esperar, dado que estas condiciones de luz y temperatura altas se dan en la época de lluvia, que es la estación de crecimiento. La disminución en clorofila como mecanismo protector se ha observado en época de verano del clima mediterráneo, en la que se observan condiciones de luz y temperatura altas en época de secas (Kyparissis et al., 1995; Bitá y Gerats, 2013). En el caso de esta tesis, mantener un alto contenido del pigmento podría ser benéfico en términos de tasas eficientes de utilización de radiación alta (Lambers et al., 2008). Considerando esto último se puede pensar que *C. macrocarpa* podría tener mecanismos que protejan contra la degradación de clorofila cuando TA y RFA son altos; quizá aproveche la disponibilidad de recursos abióticos para contrarrestar el daño y sintetizar pigmento, lo que indicaría la correlación positiva con los regresores.

Sin embargo, el estrés hídrico afectó negativamente a *C. macrocarpa*, lo que se apoya con la correlación positiva con θ_v , el desarrollo de palidez y consecuente senescencia de hojas cuando el contenido de agua en el sustrato llegó al mínimo. Estos cambios ocurrieron más rápido en comparación con las otras especies, de manera que *C. macrocarpa* pareciera tener menos tolerancia al estrés por agua en condiciones de luz y temperaturas altas, tirando sus hojas y produciendo nuevas si el estrés es liberado en corto tiempo. Kyparissis et al. (1995) demostraron en *Phlomis fruticosa*, una especie de clima mediterráneo, bajo condiciones naturales, que la disminución de clorofila se correlacionaba con el déficit de agua durante el verano, durante el mismo periodo seco Fv/Fm se mantuvo relativamente alto y no hubo senescencia foliar; la disminución del pigmento se interpretó como respuesta fotorreguladora y adaptativa hacia condiciones estresantes, con lo que se reduciría la sobreexcitación y el fotodaño.

Los resultados indicarían que *C. macrocarpa* no tiene mecanismos adecuados para soportar las condiciones experimentales (al menos según las variables fisiológicas estudiadas en este trabajo), por lo que, sin un cuidado adecuado, sería inviable para un techo verde en la zona de estudio. Se propone que esta especie se desarrollaría mejor bajo sombra, con riego más frecuente y/o en un sustrato más profundo. Por otro lado, no se descarta la idea de que el tiempo de estudio quizá no permitió observar algún efecto de aclimatación de la especie hacia las condiciones de luz y temperatura.

VIII. 4. Relaciones de Temperaturas en los Modelos Experimentales

En este estudio el efecto térmico de la cubierta ajardinada fue evidente. La base biofísica del efecto térmico se puede entender considerando un techo verde como una masa con alta capacidad calorífica y baja transmitancia térmica (Figuroa y Schiler 2009; La Roche et al. 2014); es por esto que se consideran más como un efectivo sistema aislante o de insulación (Palomo-Del Barrio, 1998). Las principales propiedades de los componentes de un techo verde que le permiten actuar como un regulador de temperatura son: la capa de sustrato que actúa como resistencia al flujo de calor, el follaje que brinda sombra y capta la energía solar y la evapotranspiración, con la que se refresca el ambiente inmediato (Palomo-Del Barrio, 1998; Mukherjee et al. 2013; La Roche y Berardi, 2014). En términos de energía, del 100% de energía solar que llega a un techo verde, entre el 20 y 30% es reflejada, alrededor del 60% se aprovecha para fotosíntesis y menos del 20% se transmite como calor al medio de crecimiento (La Roche y Berardi, 2014).

A partir del fenómeno de conductividad térmica en los suelos se podrían explicar los patrones de temperatura detectados en los modelos experimentales. Primero se considerará el patrón diurno, en el cual se determinó que la temperatura de los modelos fue menor que la del control y la del ambiente (Figuras 15 y 16). En un suelo, durante el día, el calor se transmite desde la superficie, que se es más caliente por estar directamente expuesta a la radiación solar, hacia capas más profundas, que permanecen relativamente frescas (Bonan, 2002). Con esta explicación se puede pensar que la parte más profunda del sustrato, que estuvo más en contacto

con el espacio interno del modelo, pudo haber permanecido más fresca que la superficie, lo cual permitiría que la temperatura dentro se conservara baja. Jim Y Tsang (2011) registraron una temperatura máxima de 58.80° C a nivel del suelo en un techo verde intensivo, a partir de los 10 cm de profundidad las máximas se estabilizaron, rondando los 31° C, lo que muestra la baja capacidad de difusión de calor del sustrato de un techo verde; este efecto puede ser más efectivo con humedad en el suelo; esto se realizó durante un verano en Hong Kong. En la porción de sustrato los mecanismos de transmisión de calor son: la conducción a través de las fases líquidas y sólidas, la convección entre las fases líquidas y gaseosas y el calor latente transferido por vapor a través de los poros (Del Barrio, 1998).

En el caso del modelo control (cubierto únicamente con unicel) el amortiguamiento de la temperatura pudo haber sido bajo en comparación con M1 y M2, pues los modelos fueron frescos durante parte del día. Se puede pensar que el unicel actuó como una barrera débil al flujo de calor, facilitando su difusión hacia el interior del control, comparado con los modelos ajardinados, en los que la cubierta tipo techo verde actuó como resistencia térmica, amortiguando el incremento de la temperatura interna.

La transmisión de calor hacia lo profundo del sustrato y la disminución de la carga energética conforme empieza a caer el sol permite que la superficie del suelo se vaya refrescando. Durante la noche el gradiente de temperatura en los suelos es inverso, es decir, las capas profundas permanecen a mayor temperatura, el calor entonces se transmite hacia la superficie, la cual permanece relativamente a menor temperatura, pues disipa el calor durante las horas frescas nocturnas (Bonan, 2002). A estas horas se detectó en los modelos una mayor temperatura que el control y la ambiente (Figuras 15 y 16), lo cual pudo haber sido causado por que las capas más profundas del sustrato se conservaron más calientes durante la noche y al estar en contacto con el espacio interno provocó que se conservara aire caliente (calor sensible), o pudo haberse transmitido energía calorífica por convección, de los módulos ajardinados hacia el espacio interno de los modelos. Otra posible explicación sobre las diferencias nocturnas es lo propuesto por La Roche y Berardi (2014): un día muy caliente minimiza la posibilidad de enfriamiento pasivo nocturno en el espacio cubierto por el techo verde, pues la temperatura nunca es lo suficientemente baja como para disipar completamente el calor acumulado durante el día. Como se explicó anteriormente, el recubrimiento del control pudo haber sido menos resistente al flujo de calor en comparación con los modelos, los cuales, al ser más resistentes

(debido a la presencia de la cubierta ajardinada) dificultaron la disipación del calor conservado en el interior, mientras que en el control el aire caliente se disipó con facilidad, siendo relativamente más fresco. Además, la creación de un menor gradiente de temperatura interior/ambiente en el control pudo acelerar la pérdida de calor durante la noche, aunado a la menor resistencia del unicel a la transmisión de calor.

Las diferencias de temperatura entre el exterior y el interior de los modelos encontradas en este estudio, así como el patrón diario de variación, son similares a las reportadas por La Roche (2009), quien encontró que el interior de un cuarto experimental con techo verde de pasto, la temperatura fue 3.6° C más fresca que el exterior; esto se realizó durante el mes de Septiembre del 2005, en el sur de California. Años después, en ese mismo experimento se sustituyó el pasto por suculentas y reportan el curso de temperaturas internas durante dos días. El patrón de temperaturas entre un control sin techo verde y el cuarto naturado coinciden con el presente trabajo: durante el día el espacio con techo verde se mantiene más fresco que el control, pero en la noche ocurre lo contrario. La Roche y Berardi (2014) encuentran el mismo patrón en los mismos modelos experimentales y reportan los cursos durante dos días de agosto.

La propiedad de mantener fresca la temperatura del inmueble se traduce en ahorro energético. Las altas temperaturas de las ciudades conllevan a un mayor uso de sistemas de refrigeración para enfriar el aire de los edificios, por consecuencia aumenta el uso y generación de energía eléctrica, finalmente se producen gases contaminantes y de efecto invernadero, exacerbando los problemas de calidad del aire (Jim y Tsang, 2011). La carga de enfriamiento se refiere a la cantidad neta de calor que es necesario retirar para compensar la ganancia de calor de una vivienda, con tal de obtener una temperatura confortable. Se ha demostrado que con techos verdes se reduce este fenómeno. Por ejemplo: se demostró que en Phoenix, Arizona con un techo verde se lograría disminuir hasta en un 20%, comparado con una vivienda con techo convencional (Mukherjee et al., 2013). Esto quiere decir que al conservar el inmueble más fresco el uso del aire acondicionado disminuiría, lo que se traduce en ahorro de energía eléctrica

VIII. 4. 1. Temperatura sobre la cubierta ajardinada

Por lo general se ha encontrado que las temperaturas superficiales de un techo verde son más frescas que las de uno convencional. Sonne (2006) determinó durante un verano en Florida hasta 22° C de diferencia; Ouldboukitine et al. (2011) encontró hasta 30° C durante un día cálido de verano en Francia. En el presente trabajo se encontró una diferencia máxima de alrededor de 15° C, correspondientes al 25 de agosto a las 2 p. m. entre M2 y el techo convencional (Tabla XVII). Comparado con los otros trabajos es de esperarse que la magnitud de diferencia varíe con respecto a muchas variables, como el clima regional, el tipo de techo y la cobertura de plantas.

A pesar de lo anterior, se detectó a ~ 10 cm sobre la capa de sustrato temperaturas mucho mayores que la ambiental durante el día (Figura 18). Debe aclararse para este caso que los sensores se colocaron sobre un espacio sin cobertura vegetal, totalmente expuesto al sol y sin incidencia de la sombra de las plantas, al menos al mediodía (cuando el sol alcanza su posición más vertical). El microclima dentro de los módulos pudo haber sido afectado por varios factores que pudieron haber transmitido calor convectivo hacia el sensor: las plantas, las paredes de los módulos y el sustrato.

Otro punto importante es que pudo haber existido la conservación del aire caliente dentro del módulo durante el día, debido a que las paredes de los módulos impidieron la remoción eólica de la capa de aire sobre el sustrato. Jim y Tsang (2011) explican que la velocidad del viento tiende a ser muy baja a nivel del suelo (bajo el dosel) en un techo verde y podría aumentar con la altura; una fracción del calor convectivo podría quedar atrapada bajo el dosel, incrementando la temperatura del suelo. El viento incrementaría la pérdida de calor convectivo a mayor altura sobre el dosel, reduciría el monto de radiación solar que llega a la superficie y consecuentemente la penetración de calor hacia el interior de la edificación. Las temperaturas nocturnas sobre el sustrato fueron menores a la ambiental, lo que pudo haber sido resultado de la disipación de calor de la capa de sustrato.

Las temperaturas sobre el dosel (tomadas con el termómetro infrarrojo) fueron generalmente menores a las registradas a ~10 cm sobre el sustrato (Tabla XVIII). Según lo

explicado antes, la acción eólica pudo haber tenido un papel importante en este aspecto. Es posible que el calor emitido por las plantas y el sustrato haya sido removido por el viento al nivel del dosel, mientras que más abajo (~10 cm sobre el sustrato) esto haya sido impedido por las paredes de los módulos y quizá por la misma porción aérea de las plantas. Esto último, aunado a la posición del sensor de temperatura, pudo haber provocado las diferencias diurnas tan grandes entre el sustrato y la temperatura ambiente.

Se ha demostrado que la temperatura a nivel de suelo se mantiene más fresca conforme incrementa la cobertura vegetal y/o el Índice de Área foliar (Del Barrio, 1998; Jim y Tsang, 2011; Ouldboukitine et al., 2011). Se puede afirmar que la temperatura bajo el dosel de las plantas de los modelos experimentales hubiera sido menor a la registrada por la misma acción de la sombra, esto si las mediciones se hubiesen realizado bajo una cobertura completa de las plantas. En eso reside la importancia de la cobertura vegetal en un techo verde, pues, aunque sea normal que la temperatura a nivel del suelo sea alta, se pueden esperar mejores resultados bajo un dosel continuo que en un espacio en el sustrato desprovisto de vegetación. Cuando se tiene un dosel continuo gran parte de la radiación es reflejada o absorbida por las plantas y se tiene poca luz directa bajo el dosel.

En el presente estudio se demostró el efecto de un techo verde en el intercambio de energía de esta superficie y el ambiente, sin embargo no se cuantificaron todos los factores involucrados en este intercambio energético. Este proceso es muy complejo, y se considera complicada la descripción empírica exacta del comportamiento físico de la temperatura a través del dosel (considerando este como un sistema de fuente y disipación de calor) (Del Barrio, 1998). Se demostró que las temperaturas sobre el dosel de los modelos variaron en relación con la humedad del sustrato, más que con la temperatura ambiente (Tabla XVIII). Este resultado demuestra la importancia del agua en el medio de crecimiento, pues influye en una de las funciones esperadas de un techo verde: refrescar la temperatura ambiente exterior. Este caso particular podría explicarse mediante el proceso de evapotranspiración.

La evapotranspiración es la evaporación del agua desde dos superficies: el suelo y las hojas; involucra el transporte de masa y energía hacia la atmósfera. La energía radiante se almacena en el agua y es removida (hacia el aire circundante) cuando ocurre la evaporación, evitando así que la superficie aumente de temperatura, por lo tanto se refresca (Bonan, 2002).

La evaporación ocurre cuando el agua se expone al aire seco y cesa conforme aumenta la humedad relativa del aire (RH). De esta forma se puede esperar que una hoja que transpira en un entorno seco sea más fresca que la atmósfera. Con alta humedad en el ambiente la transpiración sería menor, en cuyo caso la energía almacenada en el agua se mantendría sobre la superficie foliar, dando lugar a una temperatura mayor que la ambiental (Bonan, 2002). También se debe considerar la acción del viento, el cual remueve vapor (calor latente) de la superficie. En este contexto el aire caliente y seco de la zona de estudio pudo haber influido positivamente en la disipación de calor latente.

Según los análisis de correlación lineal múltiple, a mayor humedad se detectó menor temperatura superficial (Tabla XIX). Con poca agua disponible para las plantas sus estomas tenderían a cerrarse, evitando la difusión de vapor de agua hacia la atmósfera, además, la cantidad de agua evaporada del sustrato sería baja, resultando en una tasa de evapotranspiración baja. De esta manera con poca agua que almacene y remueva la energía calorífica, se obtendrían altas temperaturas sobre el dosel (Bonan, 2002). Al contrario, con un alto nivel de humedad en el sustrato la evaporación aumenta, al igual que la transpiración (estomas abiertos), el vapor de agua almacenaría energía, y aunando la remoción eólica del calor latente resulta una temperatura foliar más fresca.

El enfriamiento de hojas a través de la transpiración solo es benéfico a altas temperaturas, pero el problema se presenta cuando, por la alta tasa de transpiración, la pérdida de agua no se compensa con la ganancia y generalmente el recurso es limitado cuando se presentan temperaturas altas (Lambers et al., 2008). Un techo verde es un ambiente que puede ser controlado, así, aplicando riego se compensaría la pérdida de agua y se lograría disminuir la temperatura foliar, y consecuentemente también la del aire circundante. El problema entonces sería lograr el uso eficiente de agua en un clima donde la tasa de evaporación supera a la precipitación, como ocurre en los desiertos.

VIII. 4. 2. Diferencias entre M1 y M2

Existen algunas evidencias que conducen a pensar que el espacio cubierto de M2 de alguna forma tuvo influencia del aire externo. El trabajo de La Roche y Berardi (2014) ha demostrado que un espacio con techo verde se mantiene más fresco que otro con techo convencional con la acción de ventiladores. La temperatura de M2 a ~10 cm sobre el sustrato fue mayor que la de M1 durante el día (Figura 18), pero si se observan sus temperaturas interiores claramente M2 se mantuvo más fresco que M1, tanto en el día como por la noche (Figuras 15 y 16). Si el sustrato de M2 fue más caliente durante el día (lo que se deduce por las diferencias a ~10 cm sobre el sustrato; Figura 18) es de esperarse que el espacio bajo éste tendiera a calentarse por convección y, al ser más caliente que M1, se esperaría que el interior también fuera más caliente, pero en realidad fue más fresco. Otra evidencia son las diferencias nocturnas con respecto a TA, en donde se observó que el interior de M2 se conservó fresco por más tiempo y después tendió a igualarse con TA (Figura 16). La remoción de calor dentro de M2 pudo haber sido causada por espacios imprevistos entre las placas de unicel, que permitieron el flujo de aire; esto sería en todo caso un descontrol en la instalación, a pesar de que los modelos y el control se conformaron con los mismos materiales y métodos. Si esto ocurrió, aún así se considera un resultado importante, pues demostraría que en un clima cálido y seco el desempeño térmico de un techo verde puede mejorarse con el flujo de aire dentro del espacio que cubre; esto podría ser un tema para refutarse en futuras investigaciones. Si en M1 no hubo esa remoción de calor también se ha demostrado que tuvo un efecto refrescante dentro del espacio, aunque aparentemente no tan efectivo en comparación con M2.

VIII. 5. Consideraciones Sobre la Viabilidad y Manejo de las Especies Probadas y del Agua para Riego

Se considera que en cierta medida todas las especies aquí utilizadas tienen potencial para ser utilizadas en techos verdes. Se hace énfasis en una cuestión importante: las plantas utilizadas dependerán del tipo de manejo que tendría el techo verde.

En primera instancia, *Agave desmettiana* y *Portulacaria afra* se consideran las mejores para soportar las condiciones estresantes aquí estudiadas. Aparentemente *A. desmettiana* creció muy lento en comparación con *P. afra*; en parte el crecimiento lento puede ser conveniente, pues la vida del techo se alargaría y no requeriría tanto cuidado y mantenimiento; se da el inconveniente por cuestiones de cobertura, aunque aumentar el número de individuos por área podría ser una solución (aplicado a todas las especies probadas). *P. afra* tuvo un crecimiento amplio y relativamente rápido, así que con esta especie se lograría fácilmente una cobertura amplia. Ambas especies fueron fáciles de propagar vegetativamente, lo que puede ser ventajoso en cuanto a establecimiento y obtención rápida de plantas. Otra ventaja de *A. desmettiana* y de otros agaves, es que por su forma de roseta y pencas cóncavas la captación de agua se hace más eficiente, concentrándola y dirigiéndola directamente al sistema radicular.

Las especies que requerirían más cuidado son *Carisa macrocarpa* y *Encelia farinosa*; la primera se podría desarrollar mejor bajo sombra y si se mantiene bajo sol se tendría que aplicar riego constante (al menos cada cinco días según lo observado); su propagación por semillas se considera fácil, por lo que la obtención de plantas y además variedad genética no sería un problema. Puede ser conveniente la instalación de *C. macrocarpa* junto a otras especies que le confiera sombra y además que no requieran de mucha agua (*P. afra* podría ser una opción). *E. farinosa*, a pesar de que sea una especie nativa, presenta dificultades en cuanto a su obtención y establecimiento. Es delicada en cuanto al trasplante y difícil de germinar, además no ofrece mucha cobertura, al menos por lo observado en los individuos transplantados; en campo se ha visto que llegan a ser más frondosas. Esta especie naturalmente desarrolla una raíz pivotante muy profunda, lo que podría ser inconveniente para su desarrollo en un medio de profundidad limitada. A pesar de lo anterior, algunas características hacen a *E. farinosa* especialmente deseable para un techo verde en Hermosillo, como la alta reflectancia de sus hojas pubescentes,

lo cual podría conferir importantes beneficios en términos de control de temperatura del inmueble; además, por ser una especie adaptada al Desierto Sonorense, sus cuidados serían mínimos bajo este clima. Se considera que es importante determinar la mejor forma de cultivar esta especie fuera de su medio natural.

En la ciudad de Hermosillo, Sonora se presentaría cierta conveniencia en cuanto al riego, al menos durante la época más caliente. De las dos estaciones lluviosas, la más abundante es la del verano, cuando al mismo tiempo se experimentan las temperaturas más altas en el año. Con un sustrato altamente retentivo y con facilidad de infiltración y percolación, se podría disminuir el uso de agua potable para riego, aprovechando al máximo las lluvias. Otras prácticas, como el almacenamiento de agua drenada del techo verde y la de lluvia, aumentar el sombreado del suelo con los mismos doseles y el uso de especies resistentes a la sequía, pueden ser convenientes en el manejo de techos verdes en climas desérticos. Sin embargo también deben considerarse importantes las características de las lluvias. Específicamente en Hermosillo se han presentado tormentas con vientos muy fuertes, que incluso han tumbado árboles plantados dentro de la ciudad. Esto podría ser perjudicial para vegetación plantada a mayor altura, donde los vientos podrían ser más perjudiciales durante este tipo de eventos. Las inundaciones de calles son otro problema en Hermosillo durante la temporada lluviosa; con un captador de lluvia en los techos, como la capa de sustrato y plantas de un techo verde, la magnitud de esta cuestión podría disminuirse.

IX. CONCLUSIONES

Este trabajo es de los primeros sobre techos verdes en Hermosillo, Sonora. Quizá el primero (según la investigación bibliográfica para el presente trabajo) haya sido el de Alpuche et al. (2010), el cual también demostró los efectos térmicos de los techos verdes bajo el clima de Hermosillo. El presente trabajo quizá sea el primero con un enfoque biológico para esta misma zona; aquí se utilizaron algunos parámetros fisiológicos para determinar la viabilidad de plantas en condiciones similares a las de un techo verde en una ciudad de clima cálido y seco.

En este trabajo se probaron dos sustratos con diferente capacidad de retención de agua y se determinó el desempeño de cuatro especies de plantas en modelos experimentales de techo verde. Fisiológicamente se considera que las especies se desempeñaron de igual forma en ambos sustratos. Además, el contenido de agua entre los modelos fue similar en parte del experimento, a pesar de las diferencias en CRA. Cada especie respondió de manera diferente a las condiciones experimentales y es importante entender que ciertos cuidados deberían implementarse para cada una, en caso de ser requeridas para un techo verde.

No se hace una inclinación definitiva hacia uno u otro sustrato aquí probado; en todo caso se optaría por S1, debido a su alta retención de agua y ligereza, además tendió a conservar más agua a la intemperie, en comparación con S2. Debería optarse por la prueba y uso de aditivos ligeros, porosos y altamente retentivos; para el caso de los aquí probados, se considera que la turba de *Sphagnum*, la vermiculita y el tezontle son buenos candidatos como componentes de sustratos en techos verdes. Se recomienda la búsqueda y prueba de otros componentes minerales que, de igual manera, presenten las propiedades mencionadas y que además, ofrezcan estabilidad al sustrato.

La suculencia podría ser un criterio que defina el uso de plantas para techos verdes en climas cálidos y secos. Por sus características resistentes observadas en este trabajo, se considera que *Agave desmettiana* y *Portulacaria afra* fueron las mejores candidatas para su uso en techos verdes bajo el clima de Hermosillo. Debe considerarse mayor cuidado si se desea emplear a *Carissa macrocarpa* y *Encelia farinosa*, aunque no se descarta su uso. Se recomienda probar otras nativas de zonas áridas que podrían tener potencial, quizá de las familias Asteraceae,

Cactaceae, Fabaceae, Poaceae o Asparagaceae; también sería interesante determinar la viabilidad de la familia Crassulaceae.

Se demostró también el efecto térmico de la cubierta tipo techo verde. Durante las horas más calientes del día la temperatura dentro de los modelos experimentales fue menor que la exterior y que la de un control; durante la noche el aire se conservó relativamente más caliente. Sobre la cubierta la temperatura fue mayor a la ambiental pero menor a la de un techo convencional, además, la humedad del sustrato puede mantener más fresca la temperatura a nivel del dosel. Con esto se ha demostrado que bajo un clima cálido y seco una cubierta tipo techo verde podría conservar más fresca la temperatura de un inmueble. Aunque en el presente trabajo podríamos atribuir este efecto tan solo a la capa de sustrato y plantas, un techo verde consiste en más capas de diferentes materiales, las cuales también pueden influir en la transmisión de calor del exterior hacia el interior del inmueble. Es recomendado un estudio más profundo de las características térmicas de los materiales usados y de la parte vegetal, para de conocer mejor su papel en la transmisión de calor; también es recomendado emplear modelos experimentales armados con materiales más semejantes a los de un techo verde y un inmueble, lo cual se considera importante para obtener evidencias más concretas a cerca del funcionamiento de estos sistemas de naturación.

Con la información obtenida en la presente tesis se pretende dar bases sobre cómo puede ser más viable la implementación de techos verdes en Hermosillo. Se considera que aún faltan estudios para responder de manera contundente a la cuestión sobre viabilidad y funcionalidad. Por lo observado se hace una inclinación positiva hacia la viabilidad y éxito de funcionamiento, siempre y cuando se atiendan cuidados específicos.

Con este trabajo también se pretende dar una base para futuras investigaciones sobre sistemas de naturación en Hermosillo, Sonora. Se considera que parte de la importancia del presente trabajo reside en la aplicación de teoría y práctica científica a la solución de problemas ambientales, que incluso puede repercutir positivamente en aspectos socioeconómico. Como se ha dado a entender, este es un campo de estudio muy amplio e interdisciplinario cuya justificación se basa en mejorar la calidad ambiental y de vida dentro de las ciudades.

X. LITERATURA CITADA

- Adams, W. W., S. D. Smith y C. B. Osmond. 1987. Photoinhibition of the CAM succulent *Opuntia basilaris* growing in Death Valley: evidence from 77K fluorescence and quantum yield. *Oecologia* 71: 221-228.
- Adams III, W. W., I. Terashima, E. Brugnoli y B. Demmig. 1988. Comparisons of photosynthesis and photoinhibition in the CAM vine *Hoya australis* and several C3 vines growing on the coast of eastern Australia. *Plant, Cell & Environment*. doi: 10.1111/j.1365-3040.1988.tb01134.x
- Adams III, W. W., C. R. Zarter, K. E. Mueh, V. Amiard y B. Demmig-Adams. 2008. Energy dissipation and photoinhibition: a continuum of photoprotection. 49-64 p. En: Demmig-Adams, B., W. W. Adams III y A. K. Mattoo. (Eds.), *Photoprotection, photoinhibition, gene regulation, and environment*. doi: 10.1007/1-4020-3579-9.
- Alpuche, M. G., H. Moreno, J. M. Ochoa e I. Marincic. 2010. Análisis térmico de viviendas económicas en México utilizando techos verdes. *Estudios Sobre Arquitectura y Urbanismo del Desierto*, 3(3):59-67. Hermosillo, Sonora, México.
- Berreta, C., S. Poe y V. Stovin. 2014. Reprint of “Moisture content behaviour in extensive green roofs during dry periods: the influence of vegetation and substrate characteristics”. *Journal of Hydrology*. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.001>
- Bitá, C. E. y T. Gerats. 2013. Plant tolerante to high temperature in a changing environment: scientific fundamentals and production of heat stress-tolerant crops. *Frontiers in Plant Science*. doi: 10.3389/fpls.2013.00273
- Bonan, G. B. 2002. *Ecological climatology: concepts and applications*. Cambridge University Press. Cambridge, Reino Unido.
- Carolus, B., H. Porter e Y. Reynolds. 2004. *Carissa macrocarpa*. En: sitio web de South African National Biodiversity Institute (<http://www.plantzafrica.com/plantcd/carismac.htm>).

- Curtis E. M., C. A. Knight, K. Petrou y A. Leigh. 2014. A comparative analysis of photosynthetic recovery from thermal stress: a desert plant case study. *Oecología*. doi: 10.1007/s00442-014-2988-5
- De Felipe, I. y J. Briz. 2010. La naturación urbana: una apuesta para la mejora medioambiental de nuestro entorno. *ACTA* (58). Universidad Politécnica de Madrid.
- Demmig-Adams, B. y W. W. Adams III. 1996. Xanthophyll cycle and light stress in nature: uniform response to excess direct sunlight among higher plant species. *Planta* 198: 460-470.
- Demmig-Adams, B., W. W. Adams III y A. K. Mattoo. 2008. Photoprotection, photoinhibition, gene regulation, and environment. doi: 10.1007/1-4020-3579-9
- Dimmit, M. A. 2000. Biomes and communities of the Sonoran Desert region. 3–18 p. En: Phillips S. J. y P. Wentworth Comus (Eds.), *A natural History of the Sonoran Desert*. Arizona – Sonora Desert Museum Press. Tucson, Arizona, Estados Unidos de América.
- Duffield, M. R. y W. D. Jones. 1981. *Plants for dry climates: how to select, grow and enjoy*. H.P Books, Arizona, Estados Unidos de América.
- Dvorak, B y A. Volder. 2010. Green roof vegetation for North American ecoregions: a literature review. *Landscape and Urban Planning*. doi: 10.1016/j.landurbplan.2010.05.006
- Dvorak, B y A. Volder. 2012. Plant establishment on unirrigated green roof modules in a subtropical climate. *AoB Plants*. doi: 10.1093/aobpla/pls049
- Ehleringer, J. R. y O. Bjorkman. 1978. Pubescence and leaf spectral characteristics in a desert shrub, *Encelia farinosa*. *Oecologia* 36: 151-162.
- Farrel, C., R. E. Mitchell, C. Szota, J. P. Rayner y N. S. G. Williams. 2012. Green roofs for hot and dry climates: interacting effects of plant water use, succulence and substrate. *Ecological Engineering*. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.08.036>
- Favaretto, V. F., C. A. Martinez, H. H. Soriani y R. P. M. Furriel. 2011. Differential responses of antioxidant enzymes in pioneer and late-successional tropical tree species grown under sun and shade conditions. *Environmental and Experimental Botany*. doi: 10.1016/j.envexpbot.2010.06.003
- Figuroa, M. y M. Schiler. 2009. Green roof performance: passive design implications in Los Angeles, California. En: *PLEA 2009 26th Conference on Passive and Low Energy Architecture*. 22 al 24 de Junio de 2009. Quebec, Canadá.

- Flora of China Editorial Committee. Flora of China, vol. 16. En: eFloras (2008) (http://www.efloras.org/volume_page.aspx?volume_id=2016&flora_id=2). Missouri Botanical Garden, St. Louis, EUA y Harvard University Herbaria, Cambridge, EUA.
- Fondon, N. Y., S. Castro-Nava y A. J. Huerta. 2014. Field assessment of sub-epidermal leaf anthocyanin, PSII photochemistry, and the xanthophyll-cycle as photoprotective mechanisms in two morphs of *Agave striata*. Flora. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.flora.2013.12.006>
- Gaceta Oficial del Distrito Federal. 2008. Norma ambiental para el distrito federal NADF-013-RNAT-2007, que establece las especificaciones técnicas para la instalación de sistemas de naturación en el Distrito Federal. México.
- Gaffin, S. R., C. Rosenzweig, J. Eichenbaum-Pikser, R. Khanbilvardi y T. Susca. 2010. A temperature and seasonal energy analysis of green, white and black roofs. Center for Climate Systems Research. Columbia University. Nueva York, Estados Unidos de América. (<http://www.coned.com/newsroom/pdf/Columbia%20study%20on%20Con%20Edisons%20roofs.pdf>)
- Gentry, H. S. 1982. Agaves of continental North America. The University of Arizona Press. Arizona, Estados Unidos de América.
- Giovagnetti, V. y A. V. Ruban. 2015. Discerning the effects of photoinhibition and photoprotection on the rate of oxygen evolution in *Arabidopsis* leaves. Journal of Photochemistry & Photobiology, B: Biology. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2015.09.010>
- Green Roof Organisation. 2014. The Green Roof Organisation Code. (<http://www.greenroofcode.co.uk/>)
- Guralnick, L. J., P. A. Rorabaugh y Z. Hanscom III. 1984. Seasonal shifts of photosynthesis in *Portulacaria afra* (L.) Jacq. Plant Physiology 76(3): 643-646.
- Guralnick, L. J., R. L. Heath, G. Goldstein e I. P. Ting. 1991. Fluorescence quenching in the varied photosynthetic modes of *Portulacaria afra* (L.) Jacq. Plant Physiology 99: 1309-1313.
- Guidi, L. y E. Degl'Innocenti. 2012. Chlorophyll a fluorescence in abiotic stress. 359-398 p. En: Venkateswarlu, B., A. K. Shanker, C. Shanker y M. Maheswari. (Eds.), Crop Stress and its Management: Perspectives and Strategies. Springer, Países Bajos.

- Graceson, A., M. Hare, N. Hall, J. Monaghan. 2014. Use of inorganic substrates and composted green waste in growing media for green roofs. *Biosystems Engineering*. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.05.007>
- Gruzen Samnton Architects LLP, Aims Inc., Flack + Kurt Inc., Mathews Nielsen Landscape Architects P.C., SHADE Consulting, LLC. 2007. DDC cool and green roofing manual. New York City Department of Design and Construction. (http://www.nyc.gov/html/ddc/downloads/pdf/cool_green_roof_man.pdf).
- Hallik, L. y O. Kull. 2008. Light acclimation of leaf chlorophyll content. 1295-1297 p. En: Allen., J. F., E. Gantt, J..H. Golbeck, y B. Osmond (Eds.), *Photosynthesis: energy from the Sun*. 14th International Congress on Photosynthesis. doi: 10.1007/978-1-4020-6709-9_279
- Hamblin, J., K. Stefanova y T. T. Angessa. 2014. Variation in chlorophyll content per unit leaf area in spring wheat and implications for selection in segregating material. *PLoS ONE*. doi: 10.1371/journal.pone.0092529
- Hankey, A. y W. Sisulu. 2009. En: sitio web de South African National Biodiversity Institute (<http://www.plantzafrika.com/plantnop/portulacarafra.htm>)
- Hernández-Godinez, F. A. y O. Jiménez-González. 2003. El uso de la tierra de hoja en la producción de planta ornamental: caso Xochimilco. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Chapingo. División de Ciencias Forestales. Texcoco, Estado de México, México.
- Hoel, B. O. y K. A. Solhaug. 1998. Effect of Irradiance on Chlorophyll Estimation with the Minolta SPAD-502 Leaf Chlorophyll Meter. *Annals of Botany*. doi: 10.1006/anbo.1998.0683.
- Jim, C. Y. y S. W. Tsang. 2011. Biophysical properties and thermal performance of an intensive green roof. *Building and Environment*. doi: 10.1016/j.buildenv.2010.12.013
- Köhler, M. 2006. Long-Term Vegetation Research on Two Extensive Green Roofs in Berlin. *Urban Habitats* (4):1 (http://www.urbanhabitats.org/v04n01/berlin_pdf.pdf)
- Köhler, M. y A. M. Clements. 2012. Green roof infrastructures in urban areas. 249-267 p. En: Meyers, R. A (Ed.), *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*. doi: 10.1007/978-1-4419-0851-3

- Krause, G. H. y E. Weis. 1991. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology. doi: 10.1146/annurev.pp.42.060191.001525
- Kyparissis, A., Y. Petropoulou e Y. Manetas. 1995. Summer survival of leaves in a soft-leaved shrub (*Phlomis fruticosa* L., Labiatae) under Mediterranean field conditions: avoidance of photoinhibitory damage through decreased chlorophyll contents. Journal of Experimental Botany 46(293): 1825-1831.
- La Roche, P. 2009. Low cost green roofs for cooling: experimental series in a hot and dry climate. En: PLEA 2009 - 26th Conference on Passive and Low Energy Architecture. 22 al 24 Junio de 2009. Quebec, Canadá.
- La Roche, P. y U. Berardi. 2014. Comfort and energy savings with active green roofs. Energy and Buildings. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.055>
- Lambers, H., F. S. Chapin III y T. L. Pons. 2008. Plant physiological ecology. Springer-Verlag. Nueva York, Estados Unidos de América.
- Lawlor, G., Currie B. A., Doshi H y Wiedits I. 2006. Green roofs: a resource manual for municipal policy makers. Canada Mortgage and Housing Corporation. (<http://www.cmhc-schl.gc.ca/odpub/pdf/65255.pdf?lang=en>).
- Lerum, V., H. Thakare. 2005. Green roof in the desert: comparing four alternative roof systems to a standard roof. 323 – 327 p. En: 22nd Internactional Conference PLEA 2005 proceedings, vol. 1. 13 al 16 de Noviembre de 2005. República Libanesa. (<http://plea-arch.org/ARCHIVE/2005/PLEA2005ConferenceProceedingsVol1.pdf>)
- Limantara, L., M. Dettling, R. Indrawati, Indriatmoko y T. H. P. Brotosudarmo. 2015. Analysis on the chlorophyll content of commercial green leafy vegetables. Procedia Chemistry. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proche.2015.03.032>.
- Ling, Q., W. Huang y P. Jarvis. 2011. Use of a SPAD-502 meter to measure leaf chlorophyll concentration in *Arabidopsis thaliana*. Photosynthesis Research. doi 10.1007/s11120-010-9606-0
- Lundholm, J., J. S. Maclavor, Z. MacDougal, M. Ranalli. 2010. Plant species and functional group combinations affect green roof ecosystem functions. PLoS ONE. doi: 10.1371/journal.pone.0009677

- Martin, C. A. Virtual Library of Phoenix Landscape Plants.
(<http://www.public.asu.edu/~camartin/plants/Plant%20html%20files/agavedesmettiana.html>).
- Matiz, A., P. Tamaso-Mioto, A. Yepes-Mayorga, L. Freschi y H. Mercier. 2013. CAM photosynthesis in bromeliads and agaves: what can we learn from these plants? 91- 134 p. En: Dubinsky, Z. (Ed.), Photosynthesis. doi: <http://dx.doi.org/10.5772/56219>.
- Maxwell, K. y G. N. Johnson. 2000. Chlorophyll fluorescence – a practical guide. *Journal of Experimental Botany*. doi: 10.1093/jexbot/51.345.659.
- Minolta. 1989. Chlorophyll meter SPAD-502. Instructions manual. Minolta Co., Ltd., Radiometric Instruments Operations, Osaka, Japón.
- Mohanty, S., B. Grimm y B. C. Tripathy. 2006. Light and dark modulation of chlorophyll biosynthetic genes in response to temperature. *Planta*. doi: 10.1007/s00425-006-0248-6
- Mukherjee, S., P. La Roche, K. Konis y J. H. Choi. 2013. Thermal performance of green roofs: a parametric study through energy modeling in different climates. En: PLEA 2013 29th Conference, Sustainable Architecture for a Renewable Future. 10 al 12 de Septiembre de 2013. Munich, Alemania.
- Murata, N., S. Takahashi, Y. Nishiyama, y S. I. Allakhverdiev. 2007. Photoinhibition of photosystem II under environmental stress. *Biochimica et Biophysica Acta*. doi: 10.1016/j.bbabi.2006.11.019
- Nagase, A., y N. Dunnett. 2011. The relationship between percentage of organic matter in substrate and plant growth in extensive green roofs. *Landscape and Urban Planning*. doi: 10.1016/j.landurbplan.2011.07.012
- Nektarios, P., T. Panayiota y C. Loannis. 2003. Soil amendments reduce roof garden weight and influence the growth rate of lantana. *HortScience* 38 (4): 618-622.
- Ngan, G. 2004. Green roof policies: tools for encouraging sustainable design. *Landscape Architecture Canada Foundation*. (<http://www.coolrooftoolkit.org/wp-content/uploads/2012/04/Green-Roof-Policy-report-Goya-Ngan.pdf>)
- Oberndorfer, E., J. Lundholm, B. Bass, R. R. Coffman, H. Doshi, N. Dunnet, S. Graffin, M. Köhler, K. K. Y. Liu y B. Rowe. 2007. Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions and services. *Bioscience*. doi: <http://dx.doi.org/10.1641/B571005>

- Oguchi, R., K. Hikosaka y T. Hirose. Does the photosynthetic light-acclimation need change in leaf anatomy? *Plant, Cell and Environment* 26: 505-512.
- Osman, K. T. 2013. *Soils: principles, properties and management*. Springer Science+Business Media. Dordrecht, Holanda Meridional, Países Bajos. doi: 10.1007/978-94-007-5663-2_5
- Osmond, C. B., M. P. Austin, J. A. Berry, W. D. Billings, J. S. Boyer, J. W. H. Dacey, P. S. Nobel, S. D. Smith y W. E. Winner. 1987. Stress physiology and the distribution of plants. *BioScience* 37(1):38-48.
- Ouldboukhitine, S., R. Belarbi, I. Jaffal y A. Trabelsi. 2011. Assessment of green roof thermal behavior: a coupled heat and mass transfer model. *Building and Environment*. doi: 10.1016/j.buildenv.2011.06.021
- Padgett, E., L. Vázquez y E. B. Allen. 1999. Seed viability and germination behavior of the desert shrub *Encelia farinosa* Torrey and A. Gray (Compositae). *Madroño* 46(3): 126-133.
- Palomo-Del Barrio, E. 1998. Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. *Energy and Buildings* 27: 179-193.
- Pauleit, S., O. Fryd, A. Backhaus y M. B. Jensen. Green infrastructure and climate change, 224-248 p. En: Meyers, R. A (Ed.), *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*. doi: 10.1007/978-1-4419-0851-3
- Peck S. y Kuhn M. 2003. Design guidelines for green roofs. Ontario Association of Architects. Ontario, Canadá.
- Raimondo, F., P. Trifiló, M. A. Lo Gullo, S. Andri, T. Savi y A. Nardini. 2015. Plant performance on mediterranean green roofs: interaction of species-specific hydraulic strategies and substrate water relations. *AoB Plants*. doi: 10.1093/aobpla/plv007
- Ramírez, D. A., W. Yactayo, R. Gutiérrez, V. Mares, F. De Mendiburu, A. Posadas y R. Quiroz. 2014. Chlorophyll concentration in leaves is an indicator of potato tuber yield in water-shortage conditions. *Scientia Horticulturae*. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2014.01.036>.
- Reveal, J. L. y W. C. Hodgson. 2003. *Agave desmettiana*. En: *Flora of North America* Editorial Committee (Eds.). 1993. *Flora of North America*, vol. 26. Nueva York, EUA y Oxford, Inglaterra, Reino Unido.
- Schneider A., M. Fusco y J. Boussetot. 2014. Observations of the survival of 112 taxa on a green roof in a semi-arid climate. *Journal of Living Architecture*, 1(5):10-30.

- Servicio Meteorológico Nacional. 2010. Normales climatológicas del estado de Sonora, periodo 1981 a 2010, campo experimental Unison. México. (http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=170&tmpl=component).
- Shreve F. e I. L. Wiggins. 1964. Vegetation and flora of the Sonoran Desert, Volumen 1. Stanford University Press, Estados Unidos de América.
- Simmons M. T. 2015. Climates and Microclimates: Challenges for Extensive Green Roof Design in Hot Climates. 63-80 p. En: Sutton R. K. (Ed.), Green Roof Ecosystems. Springer Internacional. Suiza.
- Smith J. L., D. J. Burrit y P. Bannister. 2000. Shoot dry weight, chlorophyll and UV-B-absorbing compounds as indicators of a plant's sensitivity to UV-B Radiation. *Annals of Botany*. doi:10.1006/anbo.2000.1270.
- Sonne, J. 2006. Evaluating green roof energy performance. *ASHRAE Journal* 48: 59-61.
- Stephenson, R. 2008. Green roofs. *Cactus and Succulent Journal*. doi: 10.2985/0007-9367(2008)80[150:GR]2.0.CO;2
- Stuitz B. 2010. Green roofs are starting to sprout in american cities. *Yale Environment* 360. Última actualización: 2 de diciembre 2010. (http://e360.yale.edu/feature/green_roofs_are_starting_to_sprout_in_american_cities/2346/)
- Takahashi, S. y N. Murata. 2008. How do environmental stresses accelerate photoinhibition? *Trends in Plant Science*. doi: 10.1016/j.tplants.2008.01.005
- Taiz, L. y E. Zeiger. 2002. *Plant physiology*. Sinauer Associates. Estados Unidos de América.
- Toscano, S., D. Scuderi, F. Giuffrida y D. Romano. 2014. Responses of mediterranean ornamental shrubs to droughtstress and recovery. *Scientia Horticulturae*. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2014.08.014>
- Toscano, S., E. Farieri, A. Ferrante y D. Romano. 2016. Physiological and biochemical responses in two ornamental shrubs to drought stress. *Frontiers in Plant Science*. doi: 10.3389/fpls.2016.00645.
- Turner R. M., J. E. Bowers y T. L Burgess. 1995. *Sonoran Desert Plants: an ecological atlas*. The University Arizona Press. Tucson, Arizona, Estados Unidos de América.

- Uddling, J., J. Gelang-Alfredsson, K. Piikki y H. Pleijel. 2007. Evaluating the relationship between leaf chlorophyll concentration and SPAD-502 chlorophyll meter readings. *Photosynthesis Research*. doi: 10.1007/s11120-006-9077-5
- United Nations Population Fund. 2007. State of World Population. (https://www.unfpa.org/sites/default/files/pub-pdf/695_filename_sowp2007_eng.pdf)
- Urbano-López de Meneses B. 2013. Naturación urbana, un desafío a la urbanización. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 19(2). (<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62927563004>)
- Vázquez-Yanes, C., A. Orozco, M. Rojas, M. E. Sánchez, V. Cervantes. 1997. La reproducción de las plantas: semillas y meristemos. Fondo de Cultura Económica, México.
- Vence, L. B. 2008. Disponibilidad de agua-aire en sustratos para plantas. *Ciencia del Suelo* 26(2): 105-114.
- Vijayaraghavan, K. y F. D. Raja. 2014. Design and development of green roof substrate to improve runoff water quality: plant growth experiments and adsorption. *Water Research*. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2014.06.012>
- Werthman, C. Water and green roofs in dry climates – a speculation. Thematic Week 2: Water and City. Season 6: The Use of Water in The Urban Landscape. (https://www.zaragoza.es/contenidos/medioambiente/cajaAzul/24S6-P3Christian_WerthmannACC.pdf)
- WWF. 2012. Informe Planeta Vivo. (http://d2ouvy59p0dg6k.cloudfront.net/downloads/informe_planeta_vivo_2012.pdf)

XI. APÉNDICE

XI. 1. Fichas Descriptivas de las Especies

Se presentan las fichas descriptivas de las especies probadas en el presente trabajo. Se incluye información bibliográfica sobre la descripción general de las especies y su origen geográfico; Las fuentes de información consultadas para esto se especifican a continuación: 1) Gentry (1982), 2) Martín (2015), 3) Reveal y Hodgson (2003), 4) Turner et al. (1995), 5) Flora of China Editorial Committee (2008), 6) Carolus et al. (2004), 7) Hankey y Sisulu (2009). Los datos de propagación, riego, viabilidad para un techo verde en Hermosillo y consideraciones extra se basan en lo observado en la presente tesis.

Nombre científico (familia): *Agave desmettiana* (Asparagaceae) **Nombre común:** Agave blando, agave



Descripción

Forma de roseta suculenta, dimensiones de 1 x 1 m. aproximadamente; pencas curvadas; su rasgo distintivo son los márgenes lisos (aunque pueden desarrollarse pequeñas espinas) de las pencas, se desarrolla una espina terminal en estas (1). **Exposición:** sombra a sol total.

Riego

Una vez por semana cuando se ha establecido, aunque puede alargarse si las condiciones de humedad y temperatura son convenientes. Es tolerante a la sequía.

Origen

Probablemente nativo de la zona tropical y subtropical del este de México (2). Otros sugieren Sinaloa, México (3).

Viabilidad para un techo verde en Hermosillo

Se considera que es una especie apta para las condiciones de un techo verde en el tipo de clima de Hermosillo.

Propagación

Se recomienda la colecta cuidadosa de hijuelos alrededor de una planta madre. Los hijuelos desarrollados en la inflorescencia se establecen fácilmente sin necesidad de enraizador (mantener húmedo el sustrato para ello).

Consideraciones

Por sí sola no ofrece mucha cobertura, pero pueden plantarse varios individuos cercanos entre sí. El crecimiento se puede acelerar con riego más frecuente.

Nombre científico (familia): *Encelia farinosa* (Asteraceae) **Nombre común:** Ramablanca



Descripción

Arbusto semi-leñoso; crece hasta 1.5 m.; hojas pubescentes de color verde a verde muy pálido según condiciones. Flores pequeñas y amarillas. Hojas generalmente desarrolladas en los ápices de los tallos. Al ser arrancados, los tallos exudan una resina amarilla y muy aromática (4). **Exposición:** sol total.

Origen

Noroeste de México, suroeste de EUA (4).

Propagación

Se considera difícil. Recomendado recolectar plantas jóvenes donde la especie sea muy abundante (terrenos perturbados, baldíos). Una vez trasplantada se recomienda podar todas las hojas originales, después de riego constante se observará regeneración. Porcentaje de germinación muy bajo.

Riego

Al menos una vez a la semana en plantas trasplantadas y establecidas.

Viabilidad para un techo verde en Hermosillo

Apta pero con dificultades de manejo. Presenta propiedades que pueden ser muy útiles en un techo verde (alta reflectancia y adaptada a la aridez). Hace falta conocer un mejor manejo ornamental.

Consideraciones

Por sí sola no ofrece mucha cobertura de suelo, pero pueden plantarse varios individuos cercanos entre sí. Presenta una raíz pivotante muy profunda, que dificulta su trasplante.

Nombre científico (familia): *Carissa macrocarpa* (Apocynaceae) **Nombre común:** Carisa



Descripción

Arbusto siempre verde y muy frondoso; hojas ovadas con pequeña espina terminal, lustrosas y coriáceas. Flores pequeñas, blancas, creciendo individualmente en los ápices de los tallos. Fruto tipo baya, color rojo, jugoso y comestible (5, 6). **Exposición:** Sombra a sol total. **Origen:** Sur de África (6).

Riego

Al menos una vez cada cinco días durante temporada más caliente. Hojas arrugadas y muy pálidas indican que hace falta riego inmediato.

Propagación

Muy alto porcentaje de germinación. Es común ver frutos durante la primavera. Las semillas no requieren de tratamiento previo para germinar, tan solo un sustrato húmedo; preferentemente germinar bajo temperaturas estables, dejar crecer plántulas bajo sombra parcial y posteriormente exponerlas al sol si es requerido.

Viabilidad para un techo verde en Hermosillo

Apta pero con dificultades de manejo. No soporta mucho la falta de agua, llega al punto de perder todas sus hojas, aunque puede regenerarlas lentamente si se riega inmediatamente.

Consideraciones: Ofrece buena cobertura y puede aumentarse si se plantan varios individuos cercanos entre sí. Podría desarrollarse mejor bajo sombra parcial; se ha encontrado que bajo sol total puede sufrir alto estrés fotosintético.

Nombre científico (familia): *Portulacaria afra* (Didiereaceae) **Nombre común:** Árbol de la abundancia



Descripción

Suculenta arbustiva o arbórea. Tronco robusto, tallos color rojizo con ápices color verde, se rompen fácilmente. Tallos crecen largos, se doblan y se postran sobre el suelo. Hojas succulentas, obovadas, glabras; a alta exposición solar las hojas se tornan verde pálido a amarillas (7). **Exposición:** Sol total. **Origen:** Sur de África (7).

Riego

Al menos una vez por semana durante la temporada más seca y/o caliente. Hojas arrugadas y delgadas es señal de que requieren riego, aunque no las pierden inmediatamente. Rápidamente recuperan turgencia. Es tolerante a la sequía.

Propagación

Fácilmente por estacas. No se requiere aditivo enraizador, tan solo sustrato húmedo, preferentemente a media sombra. Enraiza a las dos semanas aproximadamente (esto se ha observado en estacas de 5 a 15 cm recién cortadas).

Viabilidad para un techo verde en Hermosillo

Se considera que es una especie apta para las condiciones de un techo verde en el tipo de clima de Hermosillo.

Consideraciones: Ofrece buena cobertura. Sus tallos largos pueden ser muy pesados y prominentes, por lo que pueden aplastar u ocultar a otras plantas más pequeñas y contiguas, para ello se recomienda poda. Se ha observado que las temperaturas altas y extremas de Hermosillo (49 ° C aproximadamente) provocan la senescencia de hojas, aunque no las pierde todas y regenera con riego.