



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**Efecto de la profundidad del sustrato en el
crecimiento y cobertura de cuatro especies de
crasuláceas en una azotea verde extensiva**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

B I Ó L O G O

P R E S E N T A:

ARIEL ACOSTA LEÓN



**DIRECTOR DE TESIS:
DRA. MARGARITA COLLAZO ORTEGA
CIUDAD DE MÉXICO**

2016



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Hoja de datos del jurado

1. Datos del alumno

Acosta

León

Ariel

56 97 36 33

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

Biología

307322874

2. Datos del tutor

Dra.

Margarita

Collazo

Ortega

3. Datos del sinodal 1

Dra.

Sonia

Vázquez

Santana

4. Datos del sinodal 2

Biól.

Panuncio Jerónimo

Reyes

Santiago

5. Datos del sinodal 3

Dra.

Helia Reyna

Osuna

Fernández

6. Datos del sinodal 4

Dra.

Florencia Tiberia Aucán

García

Campusano

7. Datos del trabajo escrito

Efecto de la profundidad del sustrato en el crecimiento y cobertura de cuatro especies de crasuláceas en una azotea verde extensiva

67 p

2016

Agradecimientos

A la máxima casa de estudios la Universidad Nacional Autónoma de México.

A la Facultad de Ciencias, al Laboratorio de Desarrollo en Plantas y a la Dra. Judith Márquez Guzmán, por abrirme las puertas de la investigación y el conocimiento.

A la Dra. Margarita Collazo Ortega por ser luz, acierto y experiencia en un camino de dudas.

A la Dra. Florencia Tiberia Aucán García Campusano por su disposición y valiosos comentarios respecto a este trabajo.

A la M. en C. María Eugenia Muñiz Díaz de León, por su amabilidad y las facilidades otorgadas en el invernadero y cámaras de secado del Taller de Plantas.

A la Dra. Sonia Vázquez Santana y la Dra. Helia Reyna Osuna Fernández por su atención y orientación académica.

Al Sr. Raúl Ramírez Noble, Jefe de Departamento de Mantenimiento y Servicios Generales, y a la Coordinación de la Investigación Científica, por confiar en mí.

Al biól. Jerónimo Reyes Santiago por brindarme el área de estudio y la oportunidad de poder desarrollar esta tesis.

Dedicatoria

A Dios, mi familia y mis amigos.

Índice

| | Página |
|--|--------|
| 1. Resumen..... | 1 |
| 2. Introducción..... | 2 |
| 3. Antecedentes..... | 4 |
| 3.1 Estudios previos con distintas profundidades..... | 4 |
| 4. Marco teórico..... | 8 |
| 4.1 Características de una azotea verde..... | 8 |
| 4.1.1 Cuidados..... | 9 |
| 4.2 Funciones de las azoteas verdes..... | 10 |
| 4.2.1 Disminución de la isla de calor urbano..... | 13 |
| 4.2.2 Secuestro de contaminantes..... | 13 |
| 4.3 Generalidades e importancia de las especies en este estudio..... | 15 |
| i. <i>Echeveria gibbiflora</i> | |
| ii. <i>Sedum dendroideum</i> | |
| iii. <i>Sedum pachyphyllum</i> | |
| iv. <i>Sedum moranense</i> | |
| 4.4 Crecimiento de plantas en las azoteas verdes..... | 20 |
| 4.4.1 Fases de crecimiento en la azotea verde..... | 21 |
| 5. Justificación..... | 22 |
| 6. Hipótesis..... | 22 |
| 7. Objetivo..... | 23 |
| 8. Zona de estudio..... | 23 |
| 9. Materiales y métodos..... | 24 |
| 9.1 Instalación de la azotea verde extensiva..... | 24 |
| 9.2 Preparación de la azotea verde extensiva..... | 25 |
| 9.3 Obtención de esquejes y tratamientos..... | 27 |
| 9.4 Plantación..... | 28 |
| 9.5 Mantenimiento..... | 28 |
| 9.6 Evaluación del crecimiento..... | 29 |
| 9.7 Análisis estadístico..... | 29 |
| 10. Resultados y Discusión..... | 30 |
| 10.1 Supervivencia..... | 30 |
| 10.2 Altura..... | 31 |
| 10.3 Diámetro del tallo..... | 37 |
| 10.4 Cobertura..... | 44 |
| 10.5 Biomasa..... | 51 |
| 11. Conclusiones..... | 56 |
| 12. Propuesta..... | 57 |
| 13. Literatura Consultada..... | 58 |
| 14. Anexo I..... | 66 |

Índice de figuras

| | Página |
|--|--------|
| Figura 1. Planta de <i>Echeveria gibbiflora</i> | 17 |
| Figura 2. Planta de <i>Sedum dendroideum</i> | 18 |
| Figura 3. Planta de <i>Sedum moranense</i> | 19 |
| Figura 4. Planta de <i>Sedum pachyphyllum</i> | 20 |
| Figura 5. Vista aérea del techo del edificio de la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Nacional Autónoma de México antes del establecimiento de la azotea verde..... | 24 |
| Figura 6. Croquis del área de estudio..... | 26 |
| Figura 6.1. Vistas del área de estudio. Se observan tres distintas áreas, dos de ellas limitadas por láminas de triplay, previo al llenado correspondientes con sustrato... | 26 |
| Figura 7. Fotografías del área de estudio con tres distintas profundidades. Aquí hay tres profundidades de sustrato A: 10 cm, B: 15 cm, C: 20 cm. | 27 |
| Figura 8. Altura promedio \pm SE de <i>S. dendroideum</i> en el tiempo en las profundidades de 10, 15 y 20 cm..... | 32 |
| Figura 9. Altura \pm SE de <i>S. pachyphyllum</i> en el tiempo en las profundidades de 10, 15 y 20 cm..... | 33 |
| Figura 10. Altura \pm SE de <i>S. moranense</i> en el tiempo en las profundidades de 10, 15 y 20 cm..... | 33 |
| Figura 11. Altura \pm SE de <i>E. gibbiflora</i> en las profundidades de 10, 15 y 20 cm..... | 34 |
| Figura 12. Altura \pm SD de cuatro especies de crasuláceas en las profundidades de 10, 15 y 20 cm..... | 35 |

| | |
|---|----|
| Figura 13. Valores de altura \pm SD de las especies <i>S. dendroideum</i> , <i>E. gibbiflora</i> , <i>S. pachyphyllum</i> , <i>S. moranense</i> . Letras distintas indican diferencias significativas.... | 36 |
| Figura 14. Altura \pm SD de las plantas por especie y profundidad. Letras distintas indican diferencias significativas..... | 37 |
| Figura 15. Diámetro del tallo \pm SE de <i>S. dendroideum</i> a través del tiempo en las profundidades de 10, 15 y 20 cm..... | 39 |
| Figura 16. Diámetro del tallo \pm SE a través del tiempo de <i>S. pachyphyllum</i> en las profundidades de 10, 15 y 20 cm..... | 40 |
| Figura 17. Diámetro del tallo \pm SE de <i>S. moranense</i> a lo largo del tiempo en las profundidades de 10, 15 y 20 cm..... | 40 |
| Figura 18. Diámetro del tallo \pm SE de <i>E. gibbiflora</i> a través del tiempo en las profundidades de 10, 15 y 20 cm..... | 41 |
| Figura 19. Diferencia estadística en los diámetros promedio \pm SD de las plantas en tres distintas profundidades 10, 15 y 20 cm. Ninguna es similar..... | 42 |
| Figura 20. Diámetro promedio del tallo \pm SD de las 4 especies. Letras distintas indican diferencias significativas..... | 43 |
| Figura 21. Interacciones especie-profundidad del diámetro promedio del tallo \pm SD. Letras distintas indican diferencias significativas..... | 43 |
| Figura 22. Cobertura de las cuatro especies de crasuláceas en tres distintas profundidades, a través del tiempo..... | 48 |
| Figura 23. Cobertura promedio \pm SD de las cuatro especies. Letras distintas denotan diferencias significativas..... | 49 |
| Figura 24. Diferencias y similitudes de cobertura \pm SD en distintas profundidades.. | 50 |

| | |
|--|----|
| Figura 25. Cobertura \pm SD por especie y profundidad. Letras distintas denotan diferencias significativas..... | 50 |
| Figura 26 Biomasa de las cuatro especies en tres distintas profundidades a lo largo del tiempo..... | 52 |
| Figura 27. Biomasa \pm SD de las cuatro especies. Letras distintas indican diferencias significativas..... | 54 |
| Figura 28. Las profundidades que no están conectadas por la misma letra son distintas estadísticamente. Biomasa \pm SD de las distintas profundidades..... | 54 |
| Figura 29. Biomasa \pm SD de las interacciones especie-profundidad. Letras distintas denotan diferencias significativas..... | 55 |

Índice de cuadros

| | Página |
|---|--------|
| Cuadro 1. Descripción de estudios en relación a la profundidad de sustrato..... | 5 |
| Cuadro 2. Número de esquejes plantados en cada profundidad..... | 28 |
| Cuadro 3. Días después de la plantación en que se alcanzó la máxima cobertura. Entre paréntesis se indica el porcentaje de máxima cobertura..... | 46 |
| Cuadro 4. Inicio de las fases de establecimiento (E) y crecimiento rápido (CR), (ddp) en cobertura de las cuatro especies en las profundidades de 10, 15 y 20 cm..... | 47 |

Listas de abreviaturas

AVE. Azotea Verde Extensiva

(CR). Crecimiento Rápido

ddp. Días después de la plantación

DHS. Diferencia Honestamente Significativa

(E). Establecimiento

HAP. Hidrocarburo Aromático Policíclico

SD. Desviación estándar

SE. Error estándar

1. Resumen

Una correcta selección de especies y de profundidad de sustrato en las azoteas verdes tiene relación con plantas más grandes y con una mayor velocidad de crecimiento, aumentando los beneficios que proporciona y reduciendo los costos de instalación.

Con el fin de obtener dichas selecciones se hizo el presente trabajo en un área de 12 x 2 m² en una azotea verde extensiva ubicada en la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) situada al sur de la Ciudad de México. Se hicieron mediciones de crecimiento (altura, diámetro del tallo, cobertura y biomasa) durante doce meses. Durante el estudio se evaluó las variables de crecimiento contra variables de especie (*Echeveria gibbiflora*, *Sedum dendroideum*, *S. moranense* y *S. pachyphyllum*), de profundidades de sustrato (10, 15 y 20 cm), y su interacción (especie*profundidad) para saber si había diferencias significativas. Los resultados indican que existe una relación entre las especies y las variables de crecimiento; que hay relación entre profundidades de sustrato y las variables de crecimiento. Así como una relación entre la interacción especie*profundidad y las variables de crecimiento. A partir de pruebas de diferencia honestamente significativas Tukey (DHS) se encontró que, en la mayoría de las evaluaciones de crecimiento, una profundidad mayor a 15 cm no brindó ningún beneficio para ninguna especie. Además, una profundidad de sustrato mayor a 10 cm no brindó ningún beneficio en biomasa para *E. gibbiflora*, *S. moranense* y *S. pachyphyllum*.

A lo largo del experimento hubo 100% de sobrevivencia en las tres distintas profundidades.

2. Introducción

El concepto naturación hace referencia a infraestructuras en zonas urbanas a través de superficies que pueden ser fachadas, cercas y/o techos, para la plantación de especies vegetales. Hay plantas que, por su resistencia a condiciones extremas de clima, retención de agua, capacidad de vivir en sustrato mínimo, resistencia a la contaminación del aire, agua y suelo, son aptas para aumentar el área plantada en el ámbito urbano en dirección vertical y horizontal (Carrazana, 2003; Oberndorfer *et al.*, 2007).

Una azotea verde es un tipo de naturación horizontal que tiene distintos tipos de beneficios debido a que la vegetación actúa como capa protectora contra la radiación solar. A la vez se minimiza el sobrecalentamiento e influye en el microclima del espacio exterior. También absorbe grandes cantidades de radiación solar y agua pluvial. Una parte de esta radiación es utilizada en los procesos fotosintéticos y biológicos de las plantas y en mecanismos evapotranspiratorios que regulan su temperatura (SMA, 2009).

La profundidad del sustrato es un aspecto importante ya que a mayor profundidad se logra una mejor retención de agua, optimizando el crecimiento de las plantas. Por lo tanto, el medio de crecimiento puede alterar el establecimiento de algunas plantas (Research Gate, 2008).

En el Distrito Federal las construcciones y vías de acceso están fabricadas de concreto y asfalto. Estos materiales generan un exceso de calor en el medio ambiente, ya que las superficies absorben energía solar. Las áreas más densamente urbanizadas corresponden a zonas con temperaturas más altas, mientras que las áreas con mayor vegetación a zonas con temperaturas más bajas (Susca *et al.*, 2011).

Este hecho da origen al fenómeno conocido como “isla de calor urbano”, que se refiere a la diferencia hasta de 10 °C en las temperaturas de sitios ubicados a la misma altitud, ya sea en zonas urbanas o rurales y con condiciones ambientales distintas (Kim, 1992). Lo anterior, combinado con el aumento de la contaminación y la cantidad de partículas suspendidas en el aire, ha contribuido a crear un ambiente poco saludable agudizando las enfermedades respiratorias.

Conocer el desempeño de las plantas en las azoteas verdes es importante debido a que se espera que tengan un tiempo de vida mínimo entre 45 y 60 años, podría ocurrir que las plantas que sobrevivan inicialmente no duren un largo plazo a causa de la variabilidad del tiempo y a otros factores como eventos de lluvia prolongados o sequías (Getter y Rowe, 2009; Nektarios *et al.* 2011).

Por ello en el presente trabajo se estudió la capacidad de crecimiento y cobertura de cuatro especies de crasuláceas en tres profundidades de sustrato distintas con la finalidad de identificar los mejores tratamientos planta – profundidad de sustrato para su uso en azoteas verdes extensivas.

3. Antecedentes

En la década de los 60 Bornkamm publicó el primer trabajo sobre azoteas verdes en Alemania. Posteriormente en los años 70s se investigó sobre distintos componentes de las azoteas verdes incluyendo estudios sobre agentes anti-raíz, membranas a prueba de agua, drenaje, medios de peso ligero y plantas. Para las dos décadas posteriores las azoteas verdes incrementaron de un millón de metros cuadrados a 10 millones en Alemania, debido a la subvención del gobierno. Otros estados europeos adoptaron estrategias similares generando así una industria de azoteas verdes. De estas experiencias se hizo una guía llamada FLL por sus siglas en alemán Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau, o en español “Investigación del paisaje alemán, desarrollo y sociedades de la construcción”. Actualmente las azoteas verdes son más populares en América, especialmente en EUA y Canadá, donde la industria de los techos verdes ha empezado a desarrollar sus propias líneas de investigación, pero no hay nada que se compare a las investigaciones que la FLL tiene y que sea específica para cada región. Los hallazgos de investigaciones recientes se agregarán a la literatura que creará los estándares para azoteas verdes en cada país. (Magil *et al.* 2011).

3.1 Estudios previos

Uno de los componentes de las azoteas verdes es la profundidad de sustrato. Dentro de las líneas de investigación muchos autores han abordado dicho tema (Cuadro 1).

Cuadro 1. Descripción de estudios en relación a la profundidad de sustrato.

| Año | Autor | Contribución | Profundidad | Evaluación | Especie | País |
|--------|------------------------|--|---|---|---|-------------------|
| 2001 | Boivin <i>et al.</i> | Las especies tienen distinta resistencia a las heladas. Los daños por baja temperatura ocurren con mayor frecuencia en 5 cm de profundidad que en otras profundidades evaluadas. | 5, 10 y 15 cm | Temperatura del sustrato. Severidad del daño por heladas. Temperatura diaria | <i>Ajuga reptans</i> , <i>Arenaria verna</i> , <i>Armenia maritima</i> , <i>Draba aizoides</i> , <i>Gypsophila repens</i> y <i>Sedum xhybridum</i> | Quebec, Canadá |
| 2005 a | VanWoert <i>et al.</i> | Sustratos más profundos promueven mayor crecimiento, pero requieren más riego porque la tasa de evapotranspiración es mayor. Establece una agenda de riego para las profundidades evaluadas. | 2, 6 y 2 cm con capa para retención de humedad. | Disponibilidad de agua en el sustrato. Biomasa del tallo | <i>Sedum álbum</i> , <i>S. kamtschaticum</i> <i>ellacombianum</i> , <i>S. pulchellum</i> , <i>S. reflexum</i> , y dos subespecies de <i>S. spurium</i> | Michigan, EUA |
| 2005 b | VanWoert <i>et al.</i> | La combinación de una baja inclinación y un sustrato profundo reducen el total de escorrentía, además las azoteas verdes extienden la duración de los eventos de escorrentía. | 2.5, 4 y 6 cm | Retención de agua pluvial en distintos tipos de sustratos e influencia de la inclinación en la azotea | <i>Sedum álbum</i> , <i>S. kamtschaticum</i> <i>ellacombianum</i> , <i>S. pulchellum</i> , <i>S. reflexum</i> , y dos subespecies de <i>S. spurium</i> | Michigan, EUA |
| 2007 | Durham <i>et al.</i> | Substratos más profundos promueven mayor crecimiento y sobrevivencia. | 2.5, 5 y 7.5 cm | Sobrevivencia, índice de crecimiento y cobertura | 25 plantas de suculentas | Medio oeste, EUA |
| 2007 | Getter y Rowe | Plantar en verano tiene tasas más altas de sobrevivencia que plantar en otoño. Hay especies de <i>Sedum</i> que no | 4, 7 y 10 cm | Sobrevivencia. | 9 especies de <i>Sedum</i> | Michigan, EUA |

| | | | | | | |
|------|----------------|--|--------------|--|--|--------------------|
| | | se ven afectadas por la estación del año en que son plantadas. | | | | |
| 2008 | Dunnett et al. | Mayor sobrevivencia, diversidad, tamaño y rendimiento floral de plantas ocurre en 20 cm de profundidad. | 10 y 20 cm | Crecimiento y propagación del individuo, porcentaje de cobertura vegetal y rendimiento floral. | 15 especies de pastos y hierbas perenes | Sheffield, Londres |
| 2008 | Getter y Rowe | La mayoría de las especies tiene un mayor crecimiento en mayores profundidades. Hay especies que crecen más rápido en sustratos menos profundos. | 4, 7 y 10 cm | Cobertura | 12 especies de <i>Sedum</i> | Medio oeste, EUA |
| 2009 | Getter y Rowe | La mayoría de las especies muestran una mejor cobertura y mayor contenido de humedad en sustratos más profundos. | 4, 7 y 10 cm | Humedad de sustrato, fluorescencia de clorofila, cobertura | 12 especies de <i>Sedum</i> | Michigan, EUA |
| 2010 | Thuring et al. | <i>Sedum</i> spp. tuvo un buen rendimiento bajo cualquier condición, <i>D. nubigenum</i> solo creció cuando se regada. La mayoría de las plantas respondió a la profundidad de sustrato. | 3, 6 y 12 cm | Biomasa del tallo. Desempeño de las plantas en distintos tipos de sustrato | <i>S. álbum</i> , <i>S. sexangulare</i> , <i>Delosperma nubigenum</i> , <i>Dianthus deltoides</i> y <i>Petrorhagia saxifraga</i> . | Pensilvania, EUA |

| | | | | | | |
|------|------------------|--|-----------------|--|--|-------------------|
| 2011 | Nektarios et al. | La especie estudiada es una planta competente para ser usada en naturaciones de zonas mediterráneas, tuvo un mejor crecimiento en 15 cm. | 7.5 y 15 cm | Índice de crecimiento, biomasa, contenido de clorofila a+b y carotenoides | <i>Dianthus fruticosus</i> sub. <i>Fruticosus</i> | Atenas, Grecia |
| 2012 | Nardini et al. | Las azoteas verdes reducen la carga térmica de la azotea; el efecto térmico está influenciado por el contenido de agua; hay reducción de la escorrentía por el efecto planta sustrato. | 12 y 20 cm | Diámetro del tallo, biomasa de tallo y hojas, y área de superficie foliar. | <i>Cotinus coggigrya</i> , <i>Prunus mahaleb</i> y 27 tipos de plantas, en su mayoría pastizales kásticos. | Noreste de Italia |
| 2012 | Rowe et al. | Las plantas que sobreviven en un principio eventualmente pueden reducir su cobertura y desaparecer debido a la competencia o por la variabilidad del clima. | 2.5, 5 y 7.5 cm | Cobertura y sobrevivencia | 25 especies de suculentas (<i>Graptopetalum</i> , <i>Phedimus</i> , <i>Rhodiola</i> y <i>Sedum</i>) | Michigan, EUA |
| 2012 | Ntoulas et al. | Los factores como la profundidad de sustrato, el riego y el tipo de sustrato influyen en los periodos de estrés, | 7.5 y 15 cm | Cobertura, índice de vegetación de diferencia normalizada y resistencia estomática | <i>Zoysia matrella</i> | Atenas, Grecia |

4 Marco teórico

4.1 Características de una azotea verde

Generalmente una azotea verde tiene un área igual que la planta baja del edificio, asimismo es la barrera principal contra la precipitación y la radiación solar. Este espacio puede tener, además de un diseño atractivo, un diseño útil convirtiéndose económica y funcionalmente en un área eficiente, y con efectos positivos en el paisaje circundante (Carter y Keeler, 2008).

Hay dos tipos de azoteas verdes: las intensivas y las extensivas. Los sistemas intensivos están caracterizados por tener un sustrato con una profundidad media superior a los 15.2 cm, lo que permite la plantación de una gran variedad de plantas, aunque se requiere de mantenimiento y tiene un alto costo. Son áreas accesibles al público (Carter y Keeler, 2008).

Los sistemas extensivos están diseñados para ser de peso ligero y de fácil adaptación a las superficies existentes. Las plantas crecen en un sustrato con una profundidad media entre 5-15.2 cm. En las azoteas verdes extensivas existe un límite en el número de plantas que prosperan por las limitadas condiciones de agua y nutrimentos (Carter y Keeler, 2008). Requieren mantenimiento mínimo, no son accesibles al público, y las especies vegetales se limitan a hierbas, pastos, musgos y suculentas. Pueden ser construidas en superficies inclinadas. En la mayoría de los casos se plantan especies de las familias Crassulaceae, Cactaceae y Agavaceae (Oberndorfer *et al.*, 2007; Arellano, 2012).

Las azoteas verdes son una tecnología considerada bioingeniería o biomimetismo, porque el ecosistema creado mimetiza varios aspectos de las interacciones llevadas por las plantas a nivel de suelo. Cabe destacar que las azoteas verdes están enfocadas al sector privado, a universidades y a ciudades que traten de atraer clientes y turistas (Oberndorfer *et al.*, 2007).

Sería importante su promoción en los centros de las ciudades dónde los edificios son más viejos y tienen una limitada capacidad de carga en sus estructuras (Nektarios *et al.*, 2011). Actualmente la Secretaria del Medio Ambiente da un incentivo fiscal del 10% en la reducción de impuestos predial por instalación de un sistema de azotea verde, siempre y cuando el sistema ocupe una tercera parte del total de la superficie y cumpla con lo dispuesto en la Norma Ambiental 013 (SEDEMA, 2016).

4.1.1 Cuidados

Las comunidades de las azoteas verdes son dinámicas, y con el tiempo, es probable que cambie la composición original. Asimismo, hay establecimiento “espontáneo” de plantas raras. Las especies de *Sedum* pueden perder la competencia contra herbáceas en substratos mayores a 10 cm de profundidad, porque esto le brinda oportunidades a las últimas de crecer y cubrir a las primeras (Oberndorfer *et al.*, 2007). Es por eso que parte del mantenimiento incluyó deshierbar el área de estudio periódicamente.

Asimismo, es importante la irrigación en las fases de establecimiento. Una insuficiencia de agua durante la fase de establecimiento puede dar como resultado

raíces atrofiadas y una disminución permanente en el tamaño de la hoja, que inhibe la captura de agua y nutrientes y reduce el área para la fotosíntesis. Incluso después que el agua es reincorporada el crecimiento de una planta enana puede verse restringido (Thuring *et al.*, 2010; Dunnett y Nolan, 2004; Durhman *et al.*, 2007; Monterusso *et al.*, 2005). Debido a que la plantación se realizó en época de sequía, se aplicaron diversos riegos sin una agenda estricta, el cual se realizó durante el periodo de establecimiento.

Para mantener solo el crecimiento vegetativo se cortaron las flores, ya que es considerado un heterótrofo que depende de los fotosintatos asimilados por otras partes de la planta, siendo una gran inversión energética (Bustan y Goldschmidt, 2002). De esta forma se aseguró que las plantas enfocaran su energía en el crecimiento y no en la reproducción.

4.2 Funciones de las azoteas verdes

Una azotea verde es un sistema que presta servicios ecosistémicos y otros beneficios (Peck *et al.*, 1999; Kumary Kaushik, 2005; Oberndorfer *et al.*, 2007; Susca *et al.*, 2011; Arellano, 2012). Los servicios son simultáneos y generales en cada sistema: disminución de la temperatura de la superficie de la azotea, disminución del uso de energía dentro de la construcción (Peck *et al.*, 1999; Kumar y Kaushik, 2005; Susca *et al.*, 2011). Cabe destacar que la reducción de uso de energía dentro del edificio acondicionado con la azotea verde es porque la vegetación evapotranspira creando ambientes más agradables (Oberndorfer *et al.*, 2007; Nektarios *et al.*, 2011) y porque el albedo superficial aumenta afectando la

temperatura superficial de la azotea y, como consecuencia, el uso de energía dentro del edificio es menor (Nektarios *et al.*, 2011; Susca *et al.*, 2011).

Las azoteas verdes son un sistema que retiene agua de lluvia y liberan el excedente una vez que han pasado los picos de precipitación (VanWoert *et al.*, 2005b; Carter y Rasmussen, 2006). Por otro lado, la inclinación en las azoteas aumenta la escorrentía y sustratos más hondos la disminuye. La reducción en los picos de escorrentía y la tendencia de extenderlos es importante en el manejo del agua, ya que están relacionados con el problema de las inundaciones en la Ciudad de México, de modo que las azoteas verdes retrasan la tasa de agua entrante al alcantarillado (VanWoert *et al.*, 2005b). Parte del agua regresa a la atmósfera a través de la evapotranspiración. Hay estudios que demuestran una retención del 69% en azoteas con una profundidad de sustrato mayor a 10 cm (Oberndorfer *et al.*, 2007).

Otros beneficios de las azoteas verdes son: proporcionar un hábitat natural en las zonas urbanas para la microfauna local (Kim, 2004; Brenneisen, 2005); favorecen el aislamiento de ruido, una apariencia estética (Peck *et al.*, 1999; Susca *et al.*, 2011) y captación de contaminantes (Clark *et al.*, 2008, Arellano, 2012). De igual forma hay que considerar a otras especies que se pueden asociar a las plantas sobre la azotea: briofitas y algas, así como hongos micorrízicos (Brenneisen, 2005).

Es importante señalar que son las azoteas intensivas, con planta leñosas, las que mejoran en mayor medida la calidad del aire por retener más partículas de carbono. (Oberndorfer *et al.*, 2007).

Las edificaciones también obtienen beneficios estructurales debido a que las azoteas verdes aumentan el tiempo de vida de los impermeabilizantes, ya que se dañan por los rayos ultravioleta, además de verse afectados por las expansiones y contracciones provocadas por la temperatura, haciendo menos drásticas dichas fluctuaciones (Oberndorfer *et al.*, 2007; Susca *et al.*, 2011). Hay estudios que reportan un aumento de hasta del triple en el tiempo de vida de los materiales que componen una azotea verde comparada con una azotea normal. Esto hace que las azoteas verdes sean de menor impacto porque, al hacer que los materiales duren mayor tiempo, hacen que no haya recambio del material que compone a la azotea (Susca *et al.*, 2011). Desde el punto de vista económico, los beneficios de las azoteas verdes como el control de la escorrentía, la disminución de uso de energía y la mitigación de la contaminación del aire determinan que se establezca un modelo de remuneración económica de los edificios (Clark *et al.*, 2008).

Hay numerosos estudios que establecen la correlación entre el aumento de áreas verdes y la disminución de la temperatura local, y sugieren el incremento de las mismas como estrategia para la mitigación de la isla de calor urbano (Clark *et al.*, 2008, Susca *et al.*, 2011, Nektarios *et al.*, 2011, VanWoert *et al.*, 2005a).

El clima local influye en la retención de agua de lluvia por las azoteas verdes ya que a temperaturas por debajo de los 0 °C hay una menor retención de agua de lluvia, porque la evapotranspiración y la infiltración al suelo se reducen considerablemente durante este tiempo (VanWoert *et al.*, 2005b).

4.2.1 Disminución de la isla de calor urbano

La isla de calor urbano depende de la modificación del balance energético en las áreas urbanas. Este equilibrio obedece a varios factores: cañones urbanos (calles franqueadas por edificios, a ambos lados, crean un ambiente propio de un cañón), las propiedades térmicas de los materiales de construcción, sustitución de áreas verdes por superficies impermeables que limitan la evapotranspiración y disminución del albedo urbano (Susca *et al.*, 2011).

Actualmente un 50% de la población mundial vive en ciudades que representa un 2.8% de espacio de tierra del Planeta. El crecimiento poblacional en zonas urbanas está asociado con un crecimiento de las ciudades. Con ello se relaciona el aumento de la temperatura en la ciudad debido a la acumulación de edificaciones. La diferencia de la temperatura de la superficie urbana con respecto a superficies no urbanizadas, como también una diferencia en la temperatura del aire y la reducción de la vegetación en las ciudades, provocan el efecto de Isla de calor urbano. Asimismo, hay una relación entre la temperatura del aire y la abundancia vegetal (Nektarios *et al.*, 2010; Susca *et al.*, 2011; VanWoert *et al.*, 2005a).

4.2.2 Secuestro de contaminantes

Un contaminante es la presencia de materia o formas de energía que impliquen un efecto perjudicial (riesgo, daño o molestia) en el medio ambiente (Aránguez *et al.*, 1999; Manahan, 2007).

La principal fuente de contaminación se origina de los procesos de combustión. Al producirse la oxidación de los distintos elementos que componen los combustibles,

las materias primas y el aire. El carbono presente en los combustibles y el nitrógeno del aire, al oxidarse en los procesos de combustión, generan dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno respectivamente. Por su parte, los procesos de combustión incompletos generan la emisión de monóxido de carbono y bifenilospoliclorados (Aránguez *et al.*, 1999).

Entre los principales contaminantes se encuentran los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs, moléculas de dos o más anillos de benceno con anillos adyacentes que comparten dos átomos de carbono). Los HAPs se encuentran con frecuencia en el medio ambiente y se han detectado ocasionalmente en el agua potable. Se ha confirmado que algunos HAPs son carcinogénicos en animales de laboratorio y para el hombre (Jiménez, 2001; Arellano, 2012). La manifestación de cáncer puede variar en función de la vía de exposición (Li *et al.*, 2006).

Otros contaminantes son los metales pesados. Se presentan de manera natural en el ambiente en concentraciones del orden de partes por millón y partes por billón. El problema surge cuando algunos de los elementos que a concentraciones bajas son inocuos, exceden sus concentraciones naturales como productos de las actividades humanas. La exposición del humano a especies químicas puede causar cáncer de pulmón, enfermedades crónicas de las vías respiratorias y del aparato digestivo (Li *et al.*, 2006). El Cd y el Pb no forman parte de los organismos vivos y siempre representan un peligro (Tovar, 2000).

4.3 Generalidades e importancia de las especies en este estudio

Las azoteas verdes son una tecnología que permiten la reintroducción de la flora perdida en ambientes urbanos degradados (Nektarios *et al.*, 2011). La literatura menciona que siempre es bueno utilizar plantas nativas porque están adaptadas a las condiciones climáticas generales de la región. Asimismo, una comunidad biológica nativa suscitará el establecimiento de fauna nativa.

Antes de introducir especies exóticas a la lista de plantas en las azoteas verdes de México, en especial aquellas que producen semillas de forma prolífica, su fenología, su estrategia de crecimiento, y su comportamiento intraespecífico debe ser conocido para saber que no se comporten de forma invasiva. El uso de especies nativas regionales expande el potencial de las azoteas verdes para mantener un ecosistema específico funcional. (Thuring *et al.*, 2010).

Hay dos propiedades que pueden influenciar en el crecimiento de la vegetación en una azotea verde: la resistencia y recuperación que presentan ante fluctuaciones medio ambientales, y la tasa en que se consumen los recursos. Una alta diversidad alentaría el uso más completo de los recursos (Oberndorfer *et al.*, 2007).

A partir de los criterios anteriores se eligieron las siguientes cuatro especies mexicanas de crasuláceas:

i. *Echeveria gibbiflora* De Candolle

Planta de tallo grueso que llega a medir 30 cm de alto y tiene 5 cm de ancho, simple; rosetas laxas con pocas hojas, 15 o más hojas, ovadas, de hasta 25 cm de largo y 15 cm de ancho, se estrechan hacia la base formando un peciolo de 25 mm de ancho, en el ápice son redondeadas y mucronadas o agudas, el haz es superficialmente cóncavo, las orillas usualmente son onduladas, crenuladas, oscuras y quilladas en la parte de abajo; las inflorescencias en su mayoría solitarias, paniculadas de hasta 100 cm de alto, con nueve o más, alrededor de 12 ramas florales; pedúnculo grueso, erecto; brácteas ovadas y cuneadas, de 10 cm de largo y 45 mm de ancho, gruesa en la base, en el ápice redondo y mucronado; las brácteas superiores son lineares y por debajo del cáliz; sépalos extensos con tendencia a ascender, desiguales, con un largo de hasta 11 mm, deltoides y lanceolados, agudos, las basales revelan la base gibosa de los pétalos; corola cilíndrica, pentagonal, ligeramente acampanado en el ápice, de hasta 16 mm de largo, 10 mm de diámetro en la base; pétalos ligeramente dispersos en la parte superior, quillado en la parte trasera, ahuecado hacia la base; nectarios transversales y elipsoides, de 3 mm de ancho. Flores de octubre a enero (Fig. 1) El color de las hojas es ligeramente amarillo a verde olivo, más o menos glauca, teñida de gris vinoso a lila vino; pedúnculo rosa o morado pálido con floraciones; brácteas grises teñidas de lavanda vinoso a azul oscuro; sépalos lavanda oscuro; corolla rosa si hay floración, rojiza si no la hay; pétalos por dentro son rojo brillante; los carpelos y nectarios amarillos; estilos de marrón a amarillos (Página en red: Crassulacea.com, 1997^a).

Es originaria de México, donde habita en climas semicálido a templado entre los 1000 y 2000 msnm, asociada al matorral xerófilo, bosques de encino y mixto de pino-encino (Página en red: CONABIO, NaturaLista, 2008).



Figura 1. Planta de *Echeveria gibbiflora*.

ii. *Sedum dendroideum* DC.

Un arbusto con una altura de 10 a 30 cm, muy ramificado y suave. Las hojas son aplanadas, carnosas, obovadas, redondas en el ápice, sésiles, con un ancho de 2 a 4 cm, y un largo de 1 cm. Ancha hacía el ápice; las inflorescencias son cimosas y paniculadas, de 5 a 15 cm de largo y 10 cm de ancho o menos; flores sésiles; cáliz con 5 lóbulos, los lóbulos son ovalados, 1.5 a 2 mm de largo, obtusos; los pétalos son amarillo brillante, lanceolados, agudos, con 5-7 mm de largo, extensos. Cuenta con 10 estambres; 5 carpelos (Fig. 2). Aumenta su extensión con relación de la edad, varias no presentan semillas. Se localiza en acantilados del centro de México (Britton y Rose, 1905).



Figura 2. Planta de *Sedum dendroideum*.

iii. Sedum moranense Kunth

Planta con las hojas de las ramas floríferas arregladas en varias filas con forma de espiral muy cerca una de otra. La planta es un arbusto de tallos decumbentes y de hojas pequeñas, ovadas o lanceoladas que son tan gruesas como anchas. Las hojas están casi pegadas al tallo y son obtusas. Los pétalos son blancos y los folículos son divergentes con labios prominentes y marginales. Los tallos son glabros, verdes cuando son jóvenes, y se tornan de color café o rojo oscuro, comúnmente producen raíces aéreas. Las inflorescencias son cimosas, el peso en el ápice provoca que caiga y forme un arco, las flores son sésiles o de pedicelos muy cortos. Los sépalos son ovalados o lanceolados, de distintos tamaños en la misma flor, con ramal corto de 1 a 9 mm de largo, obtuso, verde delgado, membranoso y seco, algunas veces rojo en el ápice moteado con rojo. Los pétalos son lanceolados, agudos u obtusos, mucronados, en el ápice del dorso son de color blanco, rosa, o verde. Los estambres tienen anteras rojas o moradas. Nectarios obovados, subcuadrados, truncados y subemergidos, blancos o amarillo pálido. Los

pistilos son erectos y blancos (Fig. 3). Los folículos son divergentes, de color café, o bien rojos cuando son inmaduros. Las semillas son piriformes o elipsoides, papilosas, varían entre el amarillo y el café (Clausen, 1959). Se distribuye sobre una amplia área en las partes orientales del cinturón volcánico transversal mexicano y la meseta central de México, pero su rango es disjuncto. (Página en red: Crassulaceae.com)



Figura 3. Planta de *Sedum moranense*.

iv. *Sedum pachyphyllum* Rose

Planta perenne de tallo leñoso en la base y muy ramificado, extendida o erecta, glabra todo lo largo, de 10 a 30 cm de alto. Hojas arregladas muy cerca una de otra, en posición de ángulo recto con respecto al tallo, cilíndricas, algo más pequeñas abajo, obtusa, un poco glaucas, de 3 a 4 cm de largo, de 8 a 10 mm de grueso. El tallo floral es débil, de 2 cm de largo; inflorescencias sésiles y cimosas. Las flores tienen un pedicelo corto o son sub sésiles. Sépalos son cinco, ampliamente extendidos, claviformes, verdes, obtusos, son desiguales midiendo el más largo 6 mm. Los pétalos son amarillos, ampliamente extendidos, incluso se doblan hacia

atrás, de 7 mm de largo, algo quillados en la parte trasera, con forma de cuchara en la parte superior (Fig. 4). Cuenta con 10 estambres de color amarillos. Los carpelos son erectos en un principio y de color amarillos (Página en red: Crassulacea.com, 1997b). Es una planta endémica que tiene su distribución en amplias zonas de los estados de Oaxaca y Puebla (Pérez-Calix y Franco, 2004).



Figura 4. Planta de *Sedum pachyphyllum*.

4.4 Crecimiento de plantas en las azoteas verdes

El crecimiento es la consecuencia de la división y la elongación celular. El crecimiento también considera el proceso de diferenciación. Es un cambio irreversible de tamaño, usualmente medido en términos de gramos de materia seca acumulados por unidad de tiempo (Rodríguez y Dietrich, 2006).

En las azoteas verdes las plantas deben tener un crecimiento acelerado en altura y cobertura, porque un establecimiento rápido en cobertura ayuda a reducir las hierbas invasoras y la erosión por lluvia y viento (Getter y Rowe, 2008).

En términos de costo-beneficio un crecimiento inicial rápido es importante porque entre más pronto las plantas cubran la superficie del sustrato, se requerirá un menor número de plantas y será menor el precio en relación a la instalación (Durham *et al.*, 2007). El establecimiento rápido de las plantas es crítico para una sobrevivencia a largo plazo en una azotea verde saludable.

4.4.1 Fases de crecimiento en azoteas verdes

El desarrollo de todos los cultivos, incluyendo las naturaciones, puede ser dividido en tres fases: establecimiento, crecimiento rápido y endurecimiento. En cada una de estas fases las plantas tienen requerimientos diferentes de luz, agua, espacio, tipo de atención y trabajos necesarios para mantenerlas vigorosas.

La fase de establecimiento, en el caso de esquejes, comprende desde la plantación hasta la formación de brotes y raíces. Tiene una duración de 4 a 8 semanas para un crecimiento inicial. Como algunos autores han mencionado, las plantas necesitan temperaturas cálidas, riego para mantener la humedad y baja concentración de nutrientes en el suelo (Dumroese *et al.*, 2012; Thuring *et al.*, 2010; Nektarios *et al.*, 2011).

La fase de rápido crecimiento se define como la emergencia de hojas verdaderas y hay un rápido aumento en el tamaño, particularmente en los brotes terminales, tiene una duración de 8 a 20 semanas (Dumroese *et al.*, 2012).

En la fase de endurecimiento o fase estacionaria de la planta (Página en red: TNAU Agritech Portal, 2015) el diámetro del cuello y las raíces se fortalecen, lo que significa que se acondicionan para resistir el estrés por cambios de temperatura.

Las plantas se robustecen de forma que tengan reservas de energía para sobrevivir (Dumroese *et al.*, 2012). Boivin *et al.* (2001) mencionan que el endurecimiento de las plantas es un proceso reversible cuando las plantas son expuestas a temperaturas templadas, aun siendo por un lapso breve, lo que puede provocar pérdida del endurecimiento por algún evento de estrés.

5 Justificación

Las azoteas verdes tienen diferentes funciones, entre las que se encuentran la disminución de la temperatura y el aumento de la humedad relativa ambiental. En relación a estos beneficios de temperatura se ha demostrado que plantas de mayor tamaño son mejores, con base en que tienen una mayor tasa de evapotranspiración. El éxito y costo de la azotea verde radica en la selección de plantas y profundidad de sustrato correctos. Por lo que es necesario conocer cómo influye la profundidad del sustrato en la velocidad de crecimiento de las especies que se utilizan en las azoteas verdes extensivas en el sur de la Ciudad de México.

6 Hipótesis

Ho: La profundidad del sustrato no afecta el crecimiento y cobertura en las especies de suculentas seleccionadas.

Ha: al menos en una profundidad de sustrato habrá mayor crecimiento y cobertura en las plantas.

7 Objetivo

Conocer cuál es la profundidad de sustrato donde se desarrollan mejor *Echeveria gibbiflora*, *Sedum dendroideum*, *S. moranense* y *S. pachyphyllum* en una azotea verde extensiva.

Objetivos particulares

Determinar la profundidad de sustrato que permite mayor crecimiento y cobertura de cada una de las especies en estudio.

Determinar si existen diferencias entre especies y profundidad de sustrato con respecto a su respuesta en crecimiento y cobertura.

8 Zona de estudio

La azotea verde extensiva (AVE) se instaló al sur de la Ciudad de México en el edificio de la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) (Fig. 5), por los biólogos Jerónimo Reyes, Rosario Castro Gonzáles y los diseños de los arquitectos Eduardo Alonso Aguirre y Yururia Monroy, bajo la autorización de la Dirección General de Obras, UNAM en las coordenadas latitud:19.327032, longitud: -99.1774672. Aquí prevalece un clima templado subhúmedo con lluvias en verano (600 y 900 mm) y con una temperatura entres los 14-18 °C (INEGI, 2009).



Figura 5. Vista aérea del techo del edificio de la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Nacional Autónoma de México antes del establecimiento de la azotea verde.

9 Materiales y métodos

9.1 Instalación de la azotea verde extensiva

Se instalaron las siguientes capas (FLL, 2002):

- a) Losa
- b) Primer (sellador) para que la estructura aumente su resistencia a la humedad.
- c) Impermeabilización de tipo Bicapa con carpeta asfáltica Morter Plas Jardín APP 4.00 mm anti-raíz SIKA® JM-TEXSA.
- d) Sistema drenante: Dren prefabricado “DRENTEX” Impact Garden SIKA® JM-TEXSA , compuesto de una membrana de nódulos de poliestireno (HIPS) perforado y dos cubiertas de geotextil de polipropileno a ambos lados que permiten el paso del agua.

e) Sustrato, compuesto de tepojal y composta en partes iguales.

f) Plantas

Se eligió tepojal, un tipo de arcilla de origen mexicano, por su porosidad y porque tiene una capacidad de retener nutrientes y agua por su estructura de microtuneles. Además las arcillas expandidas poseen una buena capacidad de intercambio de cationes (Nelson, 1998).

9.2 Preparación de la azotea verde extensiva

De toda la azotea verde el área de estudio designada para este proyecto fue de 12 x 2 m (Fig. 6) Se dividió en 3 secciones de 2 x 4 m, cada una para las distintas profundidades de sustrato: 10, 15 y 20 cm, éstas se limitaron con láminas de triplay de 3 mm de grosor (Fig. 6.1). A su vez cada sección se dividió en 4 partes, una para cada una de las especies.

Para determinar el volumen de sustrato para cada profundidad se tomó en cuenta que 1 m³ es equivalente a 15 costales de tepojal y 8 costales de tierra (humus); las medidas correspondientes a 4 x 2 x 0.1 m fueron llenadas con 12 costales de tepojal y 6.4 de tierra, siendo la relación 2:1 tepojal: tierra. Mientras que las medidas de 4 x 2 x 0.05 m fueron llenadas con 6 costales de tepojal y 3.2 costales de tierra (Fig. 7).



Figura 6. Croquis del área de estudio.



Figura 6.1. Vistas del área de estudio. Se observan tres distintas áreas, dos de ellas limitadas por láminas de triplay, previo al llenado correspondientes con sustrato.



Figura 7. Fotografías del área de estudio con tres distintas profundidades de sustrato. A: 10 cm, B: 15 cm, C: 20 cm.

9.3 Obtención de esquejes y tratamiento

Los esquejes se obtuvieron del invernadero del Jardín Botánico de la UNAM. De acuerdo al hábito de crecimiento de las especies se cortaron esquejes de igual tamaño. Esto no interfiere en los objetivos del experimento ya que se compara cada especie en diferentes tratamientos, y todas las especies entre sí. Siendo éste un método estandarizado y reproducible.

- a) De acuerdo a J. Reyes (Com. Pers.) el largo de los esquejes recomendables para *S. dendroideum* y *S. pachyphyllum* fue de 15 cm, sin raíz; los ejemplares de *E. gibbiflora* también fueron de 15 cm, pero con raíz; y para *S. moranense* se escogieron manojos de 1 cm.

b) A los esquejes de *S. dendroideum* y *S. pachyphyllum* se les adicionó en la base enraizador en polvo RADIX ® 1,500 ppm.

9.4 Plantación

La plantación de esquejes se realizó del 22 al 25 de octubre del 2013 (otoño). Por cada 2 m² se plantaron 33 esquejes de *E. gibbiflora*, 36 de *S. dendroideum*, 55 de *S. pachyphyllum* y 55 de *S. moranense* (Cuadro 2).

Cuadro 2. Número de esquejes plantados en cada profundidad

| Especie | Largo o diámetro | Número de plantas por 2 m ² |
|------------------------|------------------|--|
| <i>S. dendroideum</i> | 15 cm | 36 |
| <i>S. moranense</i> | 1 cm | 55 |
| <i>S. pachyphyllum</i> | 15 cm | 55 |
| <i>E. gibbiflora</i> | 15 cm | 33 |

9.5 Mantenimiento de la azotea

Deshierbe, corte de inflorescencias y riego solo durante la fase de establecimiento.

9.6 Evaluación del crecimiento

- a) Altura. Se utilizó un flexómetro de la marca Pretul. Haciendo mediciones cada dos semanas empezando 17 de enero del 2014 y terminando el 5 de diciembre del 2014.
- b) Diámetro de los tallos. Con la ayuda de un vernier se hicieron las mediciones de diámetro a la mitad del tallo. Midiendo cada dos semanas empezando 17 de enero del 2014 y terminando el 5 de diciembre del 2014.
- c) Cobertura. Se utilizó un marco de 100 x 100 cm dividido en secciones de 5 x 5 cm (cuadro entramado) (Página web: MSU, 2000) para medir el área cubierta por las especies en cada profundidad. Las mediciones se realizaron cada dos semanas, empezando el día 08 de noviembre del 2013 y terminando el 21 de noviembre del 2014.
- d) Biomasa. Se seleccionaron 3 plantas para medir la biomasa total y por órgano (raíz, tallo y hojas). Se obtuvieron los valores de peso fresco y peso seco. Las plantas extraídas fueron sustituidas por otras de igual tamaño. Esta medición se realizó en 3 ocasiones: el 11 de noviembre del 2013 (29 días después de la plantación), 21 de marzo del 2014 (150 ddp) y el 24 de octubre (367 ddp). Se realizaron en las fechas: 11 de noviembre del 2013, 21 de marzo del 2014 y 24 de octubre del 2014.

9.7 Análisis estadístico

Los datos fueron analizados a través de un análisis de varianza (ANOVA) de dos vías, y se hicieron pruebas de Tukey para establecer los tratamientos que causaban la diferencia significativa ($\alpha= 0.05$) (DHS).

El análisis estadístico tuvo como propósito evidenciar cual era el mejor tratamiento (profundidad-sustrato) en una azotea verde. Además, se compararon las medias de las especies por variable, y las medias de las profundidades por variable.

10 Resultados y discusión

10.1 Supervivencia

Se observó un 100% de supervivencia de las cuatro especies a lo largo de los 12 meses que duró el experimento, independientemente de la profundidad del sustrato evaluada. Estos resultados deben ser evaluados en el contexto de las plantas que se eligieron, tomando en cuenta sus características xerofíticas que les permite soportar los efectos de estrés por sequía (Dunnett *et al.*, 2008, Thuring *et al.* 2010) y que además se les aplicó riego.

Previamente se ha reportado que en profundidades de 2.5 cm de sustrato la mortalidad es evidente, pero las que sobreviven (*P. spurius*, *S. acre*, *S. album*, *S. hispanicum*, *S. kamtschaticum*, *S. middendorffianum*, *S. reflux*, *S. sediforme*, *S. spurium*) se mantienen sin crecer (Durham *et al.*, 2007; VanWoert *et al.*, 2005a).

Thuring en el 2010 encontró que aumentar la profundidad de sustrato de 2.5 a 6 y luego a 12 cm fue más benéfico para el crecimiento en altura para las plantas que otros parámetros como: tipos de sustrato, riego para el establecimiento de las plantas y su tolerancia a la sequía.

Además, las profundidades mínimas de sustrato afectan la resistencia que obtienen las plantas ante condiciones adversas como heladas o sequías; se reportó que hay

una sobrevivencia del 50% en sustratos con una profundidad de 5 cm y del 100 % en 7.5 cm en algunas especies de *Sedum* (Durham *et al.*, 2007).

10.2 Altura

La altura de las cuatro especies incrementó en el tiempo (Figs. 8-11). Al aumentar la profundidad de sustrato, aumentó la altura en *Sedum dendroideum*, *S. pachyphyllum* y *E. gibbiflora*. Cabe destacarse que a los 185 ddp *E. gibbiflora*, en la menor profundidad, tuvo una disminución marcada en el crecimiento debido a la herbivoría por ardillas.

Los resultados son congruentes con estudios previos que mencionan que el crecimiento de la planta se ve influenciado por la profundidad de sustrato. Lo que apoya la idea que sustratos más profundos tienen un mejor índice de crecimiento, y que sustratos más profundos son un factor que influye en la fisiología de algunas plantas en las azoteas verdes extensivas (Nektarios *et al.*, 2011).

Sustratos menos profundos tienen un menor volumen comparado contra sustratos más profundos (10 y 15 cm), además tienen una mayor pérdida de agua (Durham *et al.* 2007; Getter y Rowe 2008; VanWoert *et al.*, 2005a), lo que influye en el crecimiento en altura de las plantas. También, los factores a los que están sometidas las plantas serán los que influyan en mayor o menor magnitud, por ejemplo en periodo de secas (Nektarios *et al.*, 2011).

En el caso de *S. moranense* la altura presentó una fase de crecimiento rápido del día 87 al 241 ddp. Posterior a esto, ocurrió una tendencia de disminución en la variable de crecimiento y se presentaron oscilaciones. Esto puede deberse al hábito

de crecimiento rastrero de esta especie, en donde se observó que después del período de crecimiento inicial vertical, el tallo se extiende, o arrastra, dando la apariencia de una disminución en la altura. Dumroese *et al.*, (2012) sugiere que esto puede ocurrir como consecuencia de que la energía del tallo sea redirigida al crecimiento de la raíz, por lo que en *S. moranense* pudiera explicarla la disminución de la altura en las tres profundidades, aunque fue más evidente a los 10 y 15 cm de profundidad, tal como lo muestra la figura 10.

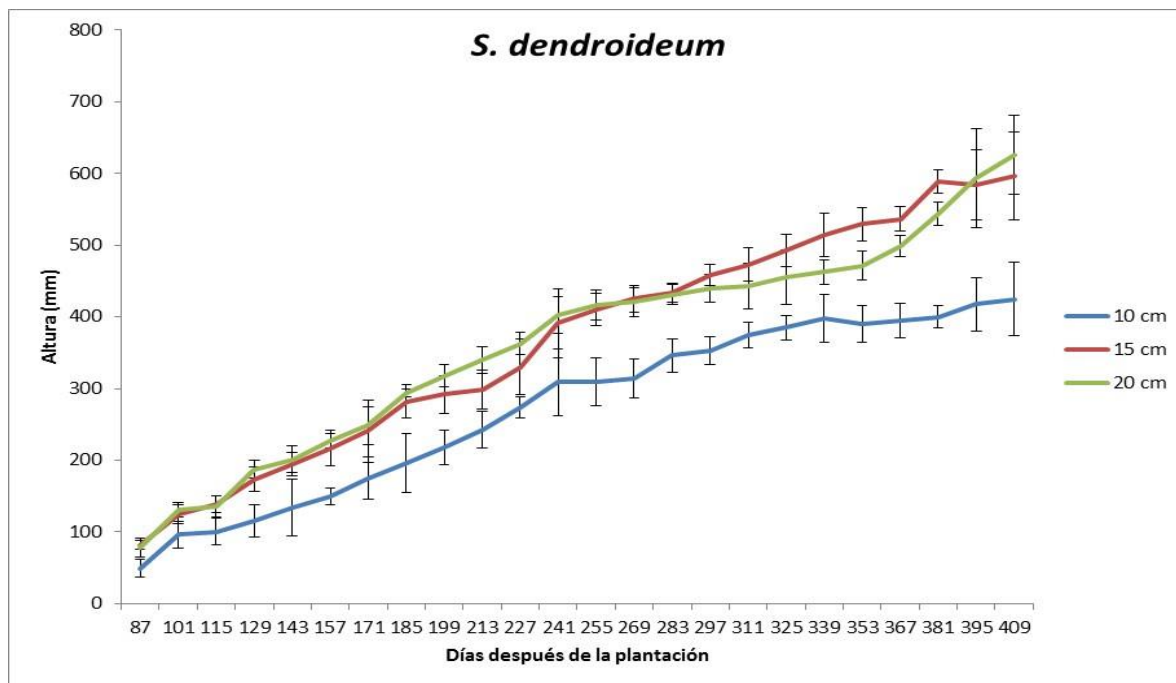


Figura 8. Altura promedio \pm SE de *S. dendroideum* en el tiempo en las profundidades de 10, 15 y 20 cm.

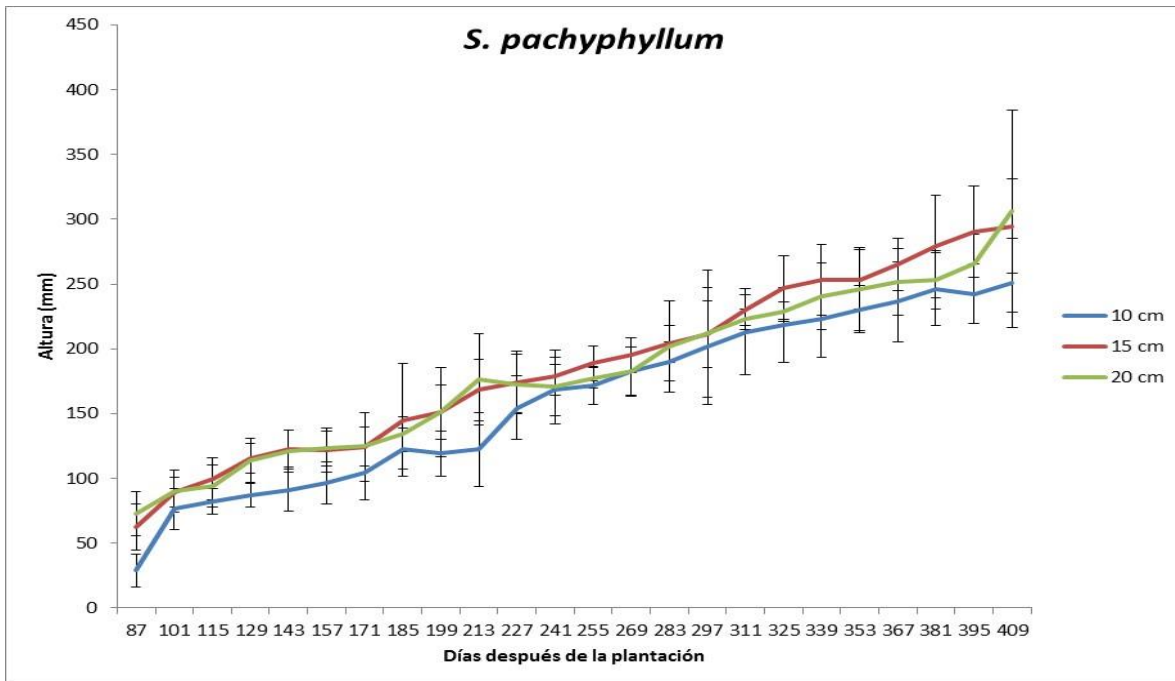


Figura 9. Altura \pm SE de *S. pachyphyllum* en el tiempo en las profundidades de 10, 15 y 20 cm.

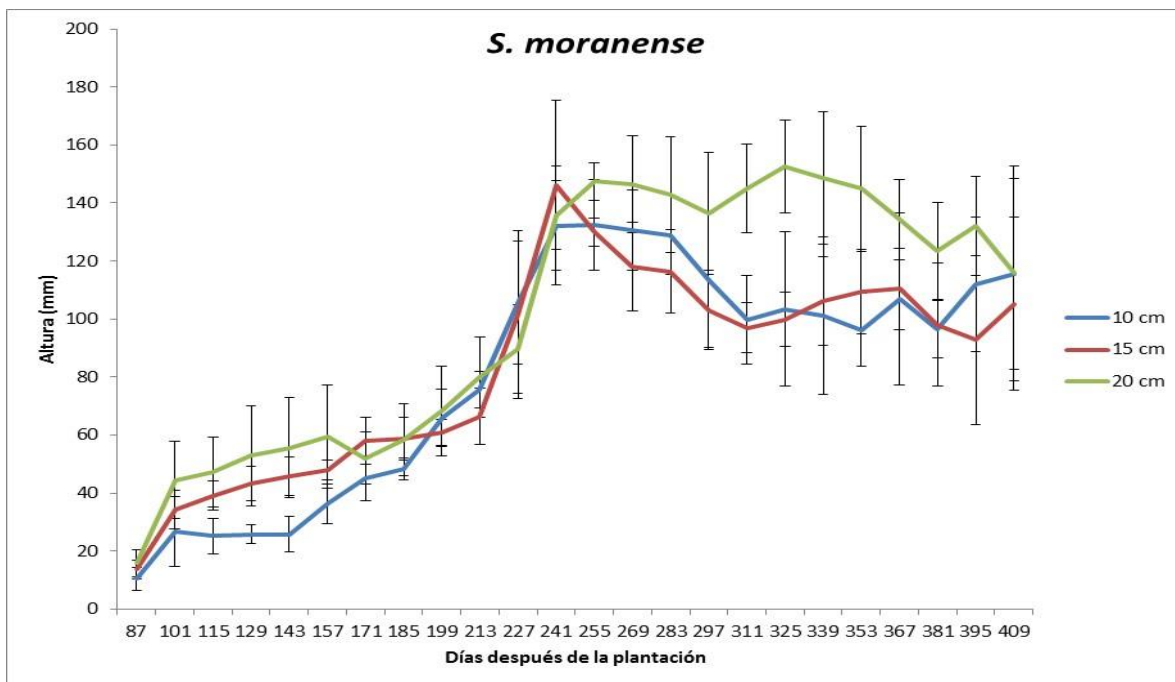


Figura 10. Altura \pm SE de *S. moranense* en el tiempo en las profundidades de 10, 15 y 20 cm.

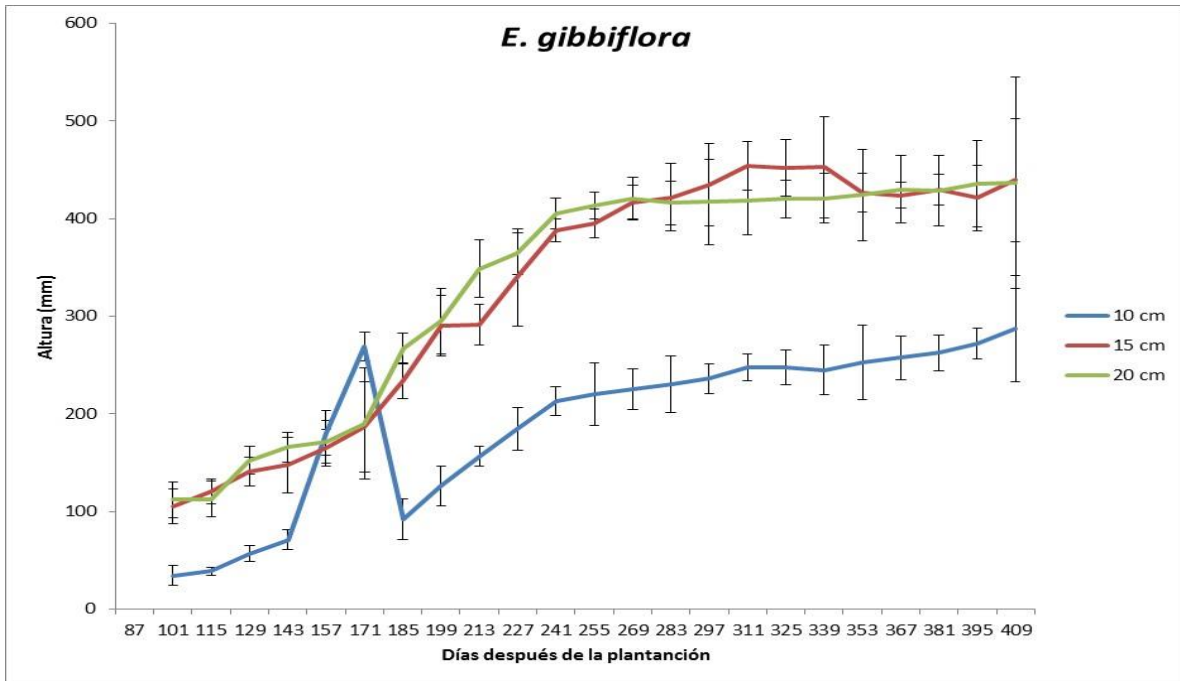


Figura 11. Altura \pm SE de *E. gibbiflora* en las profundidades de 10, 15 y 20 cm.

Hay diferencias significativas, independientemente de los factores, en las alturas a lo largo del tiempo con una $F= 6027.17$, $gl= 1, 2837$, $p<0.05$.

Se registraron diferencias significativas entre especies $F= 2685.93$ $gl= 3,2837$, $p<0.05$ y en las distintas profundidades $F= 436.02$ $gl= 2,2837$ $p<0.05$; por otro lado en la interacción entre especies y profundidades hay una $F= 92.93$ $gl= 6,2837$ $p<0.05$ (ANEXO 1, A).

De acuerdo a Tukey ($p= 0.05$) sólo la profundidad de 10 cm ($176.84 \text{ mm} \pm 1.83$) fue estadísticamente diferente a las de 15 ($241.37 \text{ mm} \pm 1.83$) y 20 cm ($244.58 \text{ mm} \pm 1.83$) (Fig. 12). Esto indica que la altura media de las cuatro especies fue similar a los 15 cm y 20 cm de profundidad. Por lo que se recomienda utilizar 15 cm de profundidad, ya que 20 cm no significa ningún beneficio en altura para las plantas.

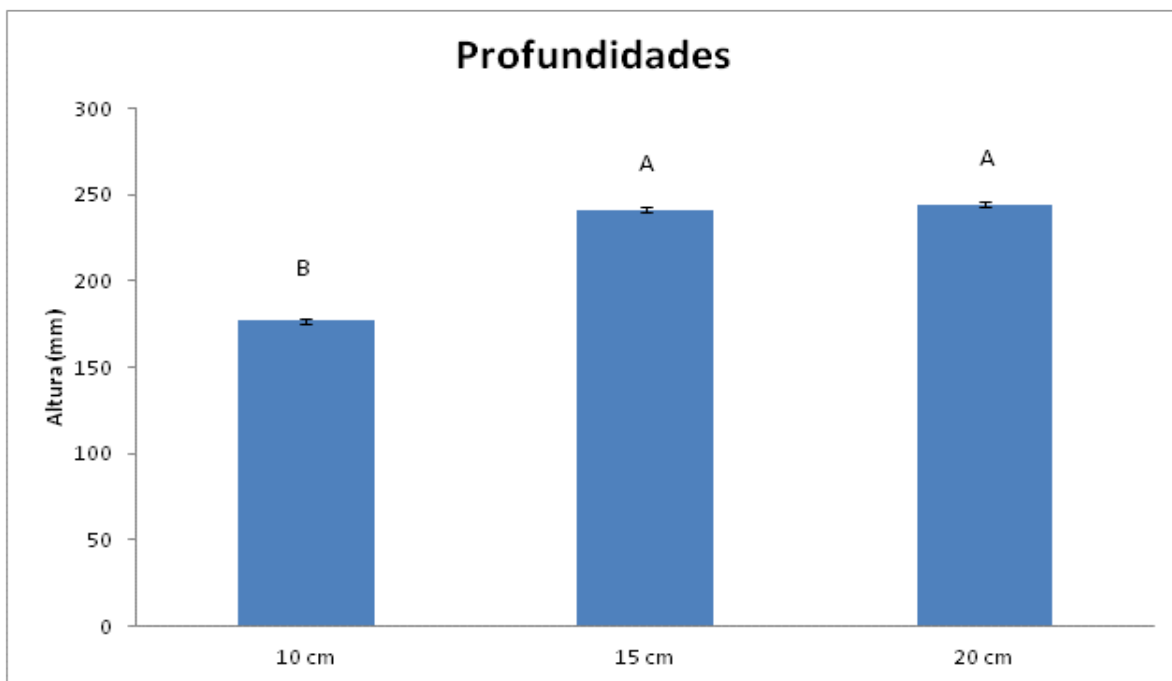


Figura 12. Altura \pm SD de cuatro especies de crasuláceas en las profundidades de 10, 15 y 20 cm.

De acuerdo a las especies también hay diferencias significativas en los valores de altura (Fig. 13) *S. dendroideum* (336.06 mm \pm 2.10), *E. gibbiflora* (280.15 mm \pm 2.14), *S. pachyphyllum* (177.29 mm \pm 2.10) y *S. moranense* (90.22 mm \pm 2.10).

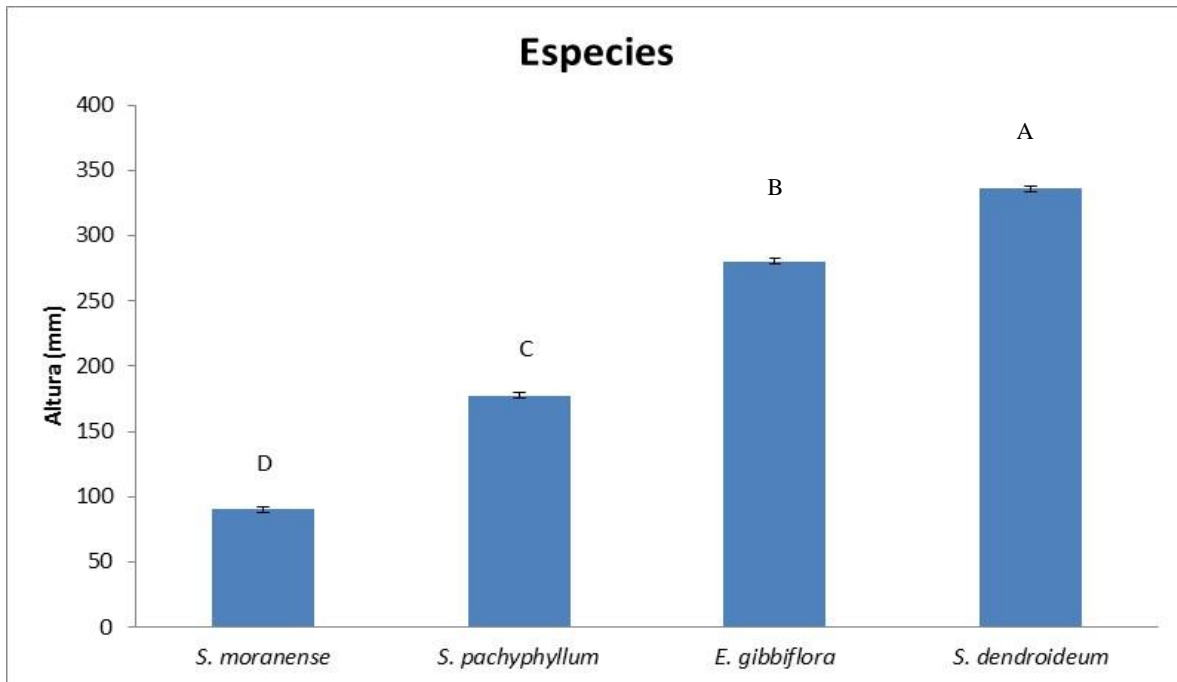


Figura 13. Valores de altura \pm SD de las especies *S. dendroideum*, *E. gibbiflora*, *S. pachyphyllum*, *S. moranense*. Letras distintas indican diferencias significativas.

De acuerdo a la interacción especie-profundidad se registraron las siguientes diferencias y similitudes (Figura 14). En la interacción *S. dendroideum**15 cm se registraron las mayores alturas en promedio a lo largo de todo el experimento, además la interacción de *S. dendroideum**20 cm fue estadísticamente la misma.

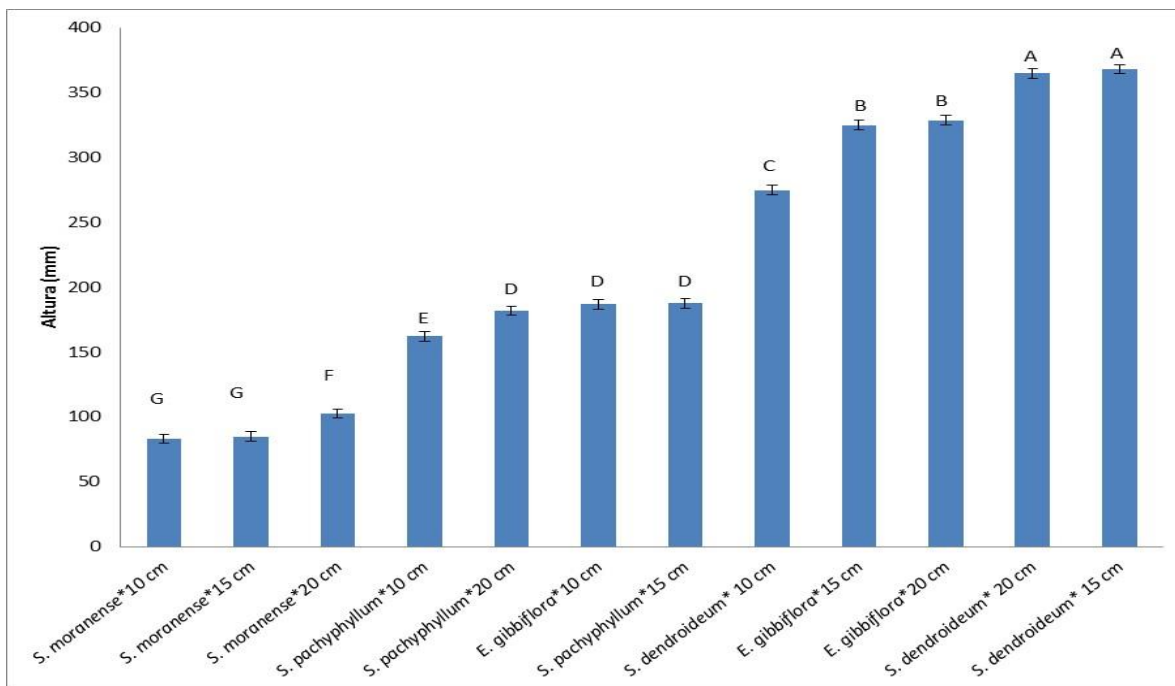


Figura 14. Altura \pm SD de las plantas por especie y profundidad. Letras distintas indican diferencias significativas.

10.3 Diámetro del tallo

De acuerdo con la profundidad de sustrato, varias especies se establecen y crecen más rápido al inicio de la plantación (Durham *et al.*, 2007). Por ejemplo, *S. dendroideum* aumentó en diámetro siguiendo el patrón “a mayor profundidad mayor diámetro”. Asimismo, en las tres profundidades hubo una fase de “crecimiento rápido” prolongado (Fig. 15)

En *S. pachyphyllum* y *S. moranense* se observaron oscilaciones en todas las fases del estudio (Figs.16 y 17). De acuerdo a Nektarios *et al.* (2011) las plantas crecen en diámetro siempre y cuando no se encuentren bajo estrés, indicando que las diferencias observadas podrían ser a causa de un mayor contenido de agua en sustratos más profundos o por la disminución de la temperatura, porque el sustrato fue el mismo para todas las profundidades. *S. dendroideum* no tuvo estas oscilaciones, y aumento el diámetro del tallo, en las distintas profundidades, con las mismas condiciones.

Las variaciones en los diámetros de los tallos en las especies mencionadas también pudieron depender de periodos de sequía y una posterior recuperación (Thuring *et al.*, 2010). Este fenómeno de recuperación en respuesta a la sequía puede ser explicado a través del CAM-ralentí que ocurre cuando plantas con metabolismo CAM se estresan de forma severa por falta prolongada de agua. Bajo sequía estas especies cierran sus estomas durante el día y la noche y reducen su tasa metabólica, manteniendo actividades bioquímicas hasta que el agua está disponible de nuevo y la planta se recupera (Sayed *et al.* 1994).

Otra explicación de las oscilaciones puede ser que la profundidad de sustrato haya afectado la tasa de división celular en los tallos durante la fase de “**crecimiento rápido**” de la planta. Esto es porque el sistema radicular en desarrollo no era lo suficientemente largo para explotar la totalidad de profundidad del sustrato, asignando más energía a este desarrollo que al crecimiento de los tallos (Dunnett *et al.*, 2008).

En el caso de *E. gibbiflora* el tallo se pudo medir a partir del día 185 ddp ya que previo a este día la parte aérea de tallo estaba cubierta por hojas, formando una roseta (Fig. 18). La profundidad de 10 cm describe claramente una curva de establecimiento y crecimiento rápido prolongado, mientras que las profundidades de 15 y 20 cm describen curvas con varias fases de crecimiento.

Dunnett *et al.*, 2008 con distintas especies de herbáceas obtuvo este mismo patrón a lo largo del tiempo, aumentando el diámetro en alguna parte del año, y luego disminuyendo de nuevo, o por debajo de los diámetros anteriormente registrados.

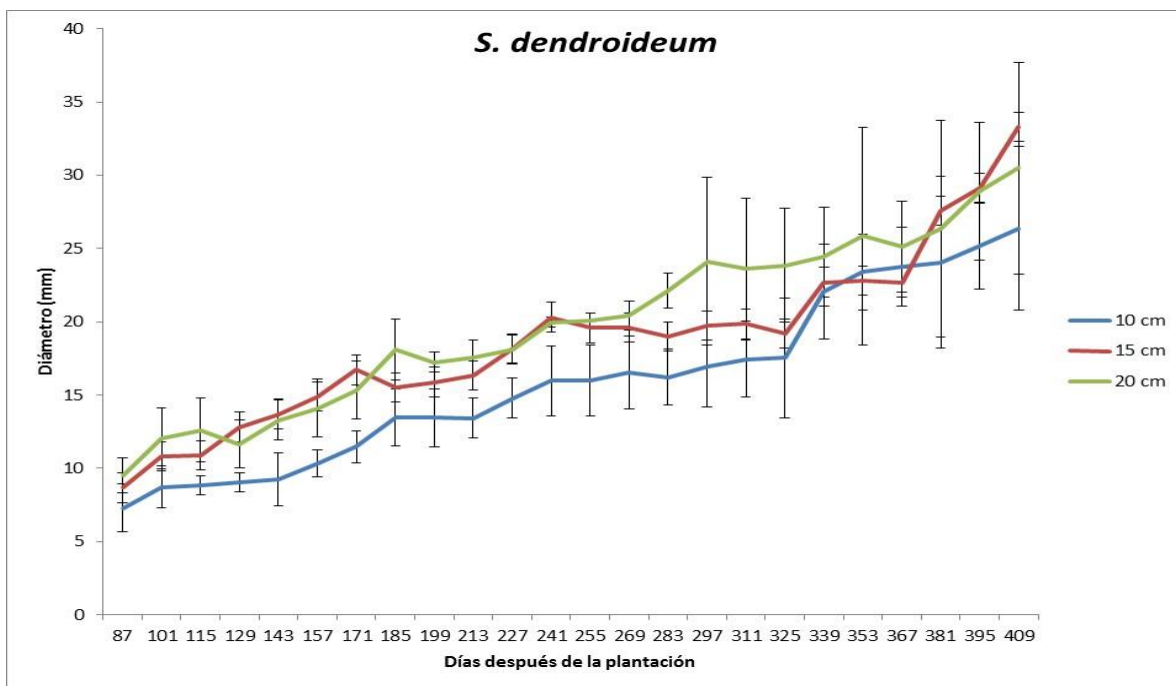


Figura 15. Diámetro del tallo \pm SE de *S. dendroideum* a través del tiempo en las profundidades de 10, 15 y 20 cm.

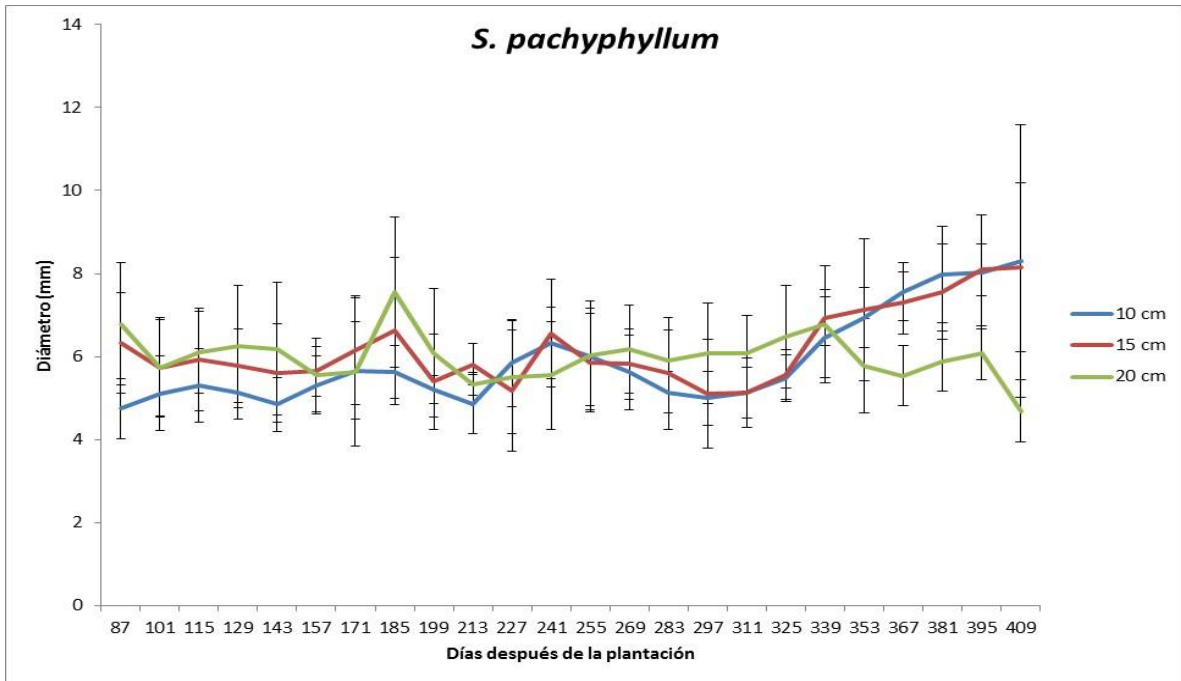


Figura 16. Diámetro del tallo \pm SE a través del tiempo de *S. pachyphyllum* en las profundidades de 10, 15 y 20 cm.

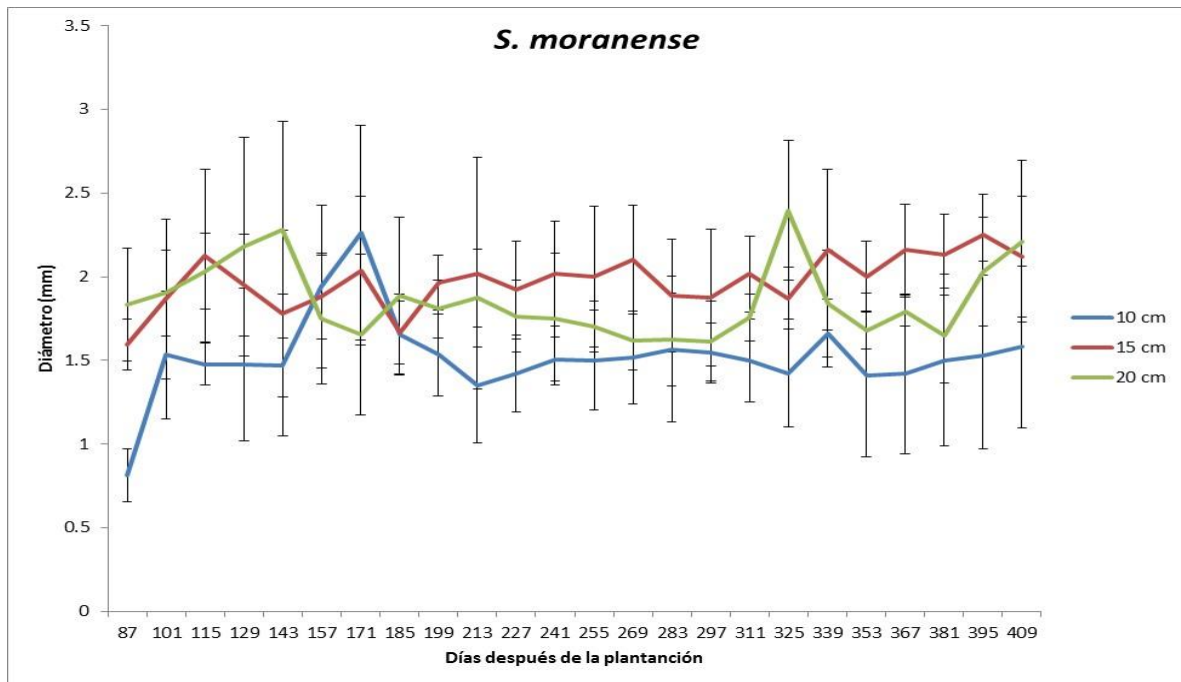


Figura 17. Diámetro del tallo \pm SE de *S. moranense* a lo largo del tiempo en las profundidades de 10, 15 y 20 cm.

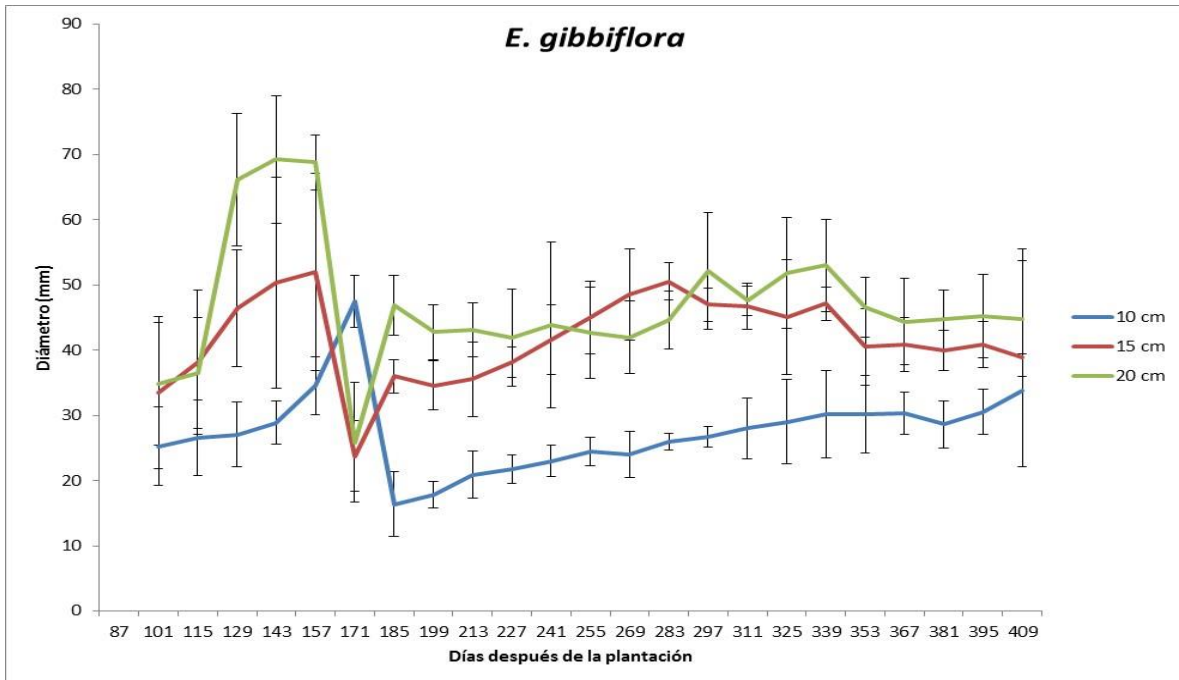


Figura 18. Diámetro del tallo \pm SE de *E. gibbiflora* a través del tiempo en las profundidades de 10, 15 y 20 cm.

Se registraron diferencias significativas en el diámetro a través del tiempo con una $F= 228.909$, $gl= 1,2837$ $p < 0.05$.

Entre las especies existieron diferencias, $F= 5809.575$ $gl= 3,2837$ $p < 0.05$, entre las distintas profundidades $F= 277.535$ $gl= 2, 2837$ $p < 0.05$, y en la interacción de estas dos últimas variables $F= 159.523$ $gl=6, 2837$ $p < 0.05$ (ANEXO 1, B).

La prueba de Tukey ($p= 0.05$) indicó que los diámetros variaron en cada una de las profundidades (Fig. 19). Por otra parte, el diámetro entre las especies fue distinto (Fig. 20). Entre tratamientos hubo 7 grupos, la combinación de hábito de crecimiento (Durham *et al.*, 2007; Getter y Rowe 2008; Getter y Rowe 2009) y profundidad de sustrato, característica que aumenta o disminuye la capacidad de retención de

humedad (Nektarios *et al.*, 2011), fueron factores que influyeron en el crecimiento en grosor del diámetro.

Era de esperarse que *E. gibbiflora* tuviera las plantas con mayor diámetro en los tallos, así como *S. moranense* con un menor diámetro, debido al hábito de crecimiento; en la Figura 21 se presenta un resumen la similitud de los tratamientos.

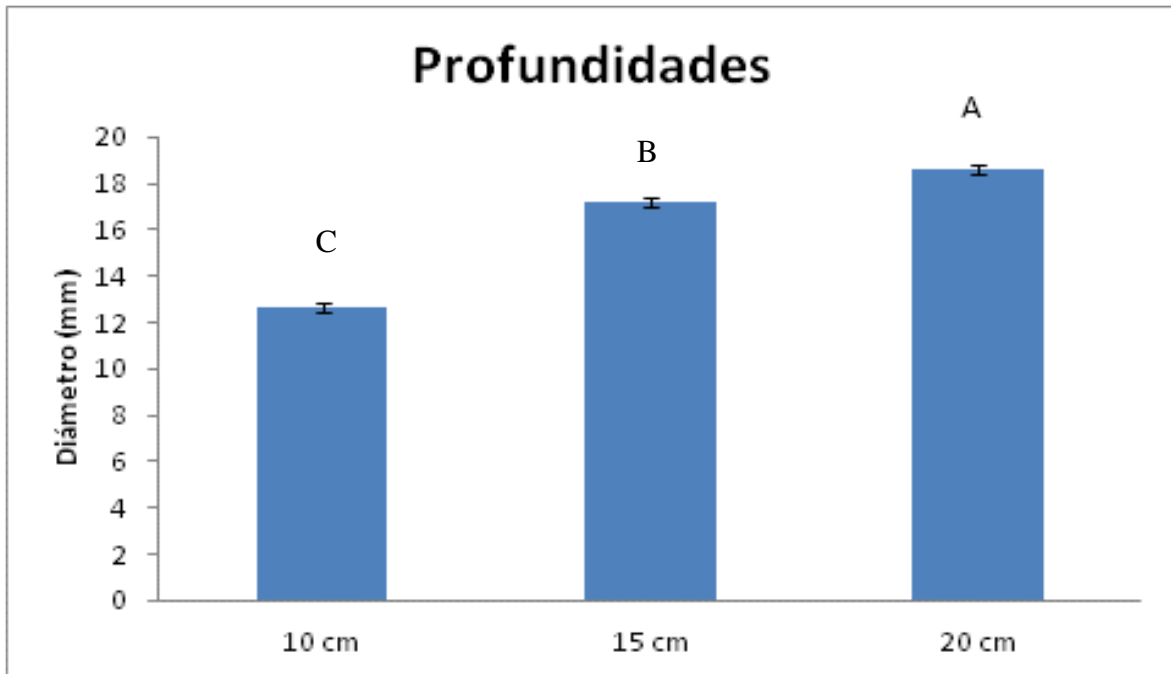


Figura 19. Diferencia estadística en los diámetros promedio \pm SD de las plantas en tres distintas profundidades 10, 15 y 20 cm. Ninguna es similar.

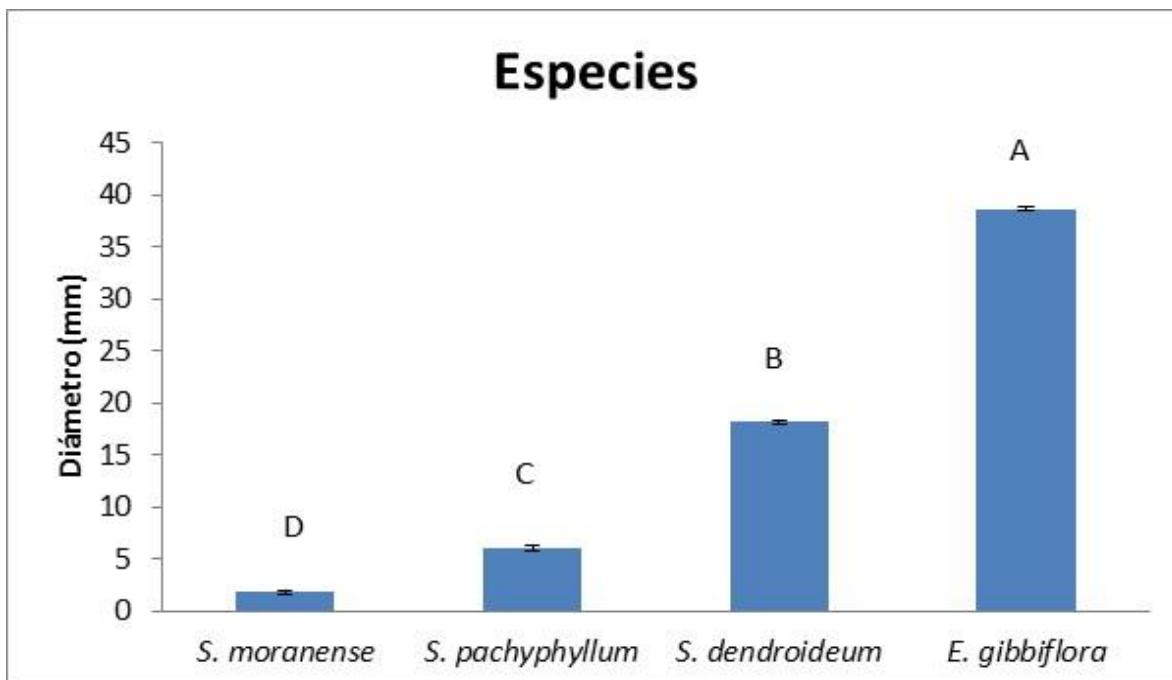


Figura 20. Diámetro promedio del tallo \pm SD de las 4 especies. Letras distintas indicas diferencias significativas.

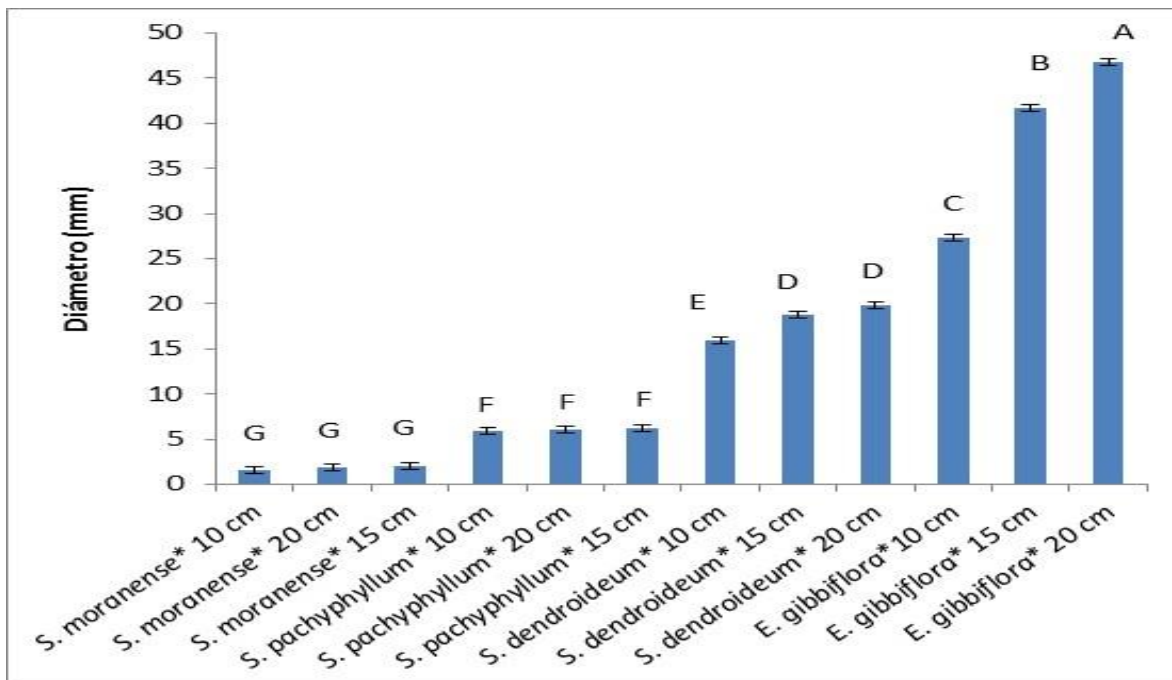


Figura 21. Interacciones especie-profundidad del diámetro promedio del tallo \pm SD. Letras distintas indican diferencias significativas.

10.4 Cobertura

En 10 cm de profundidad se registró el mayor tiempo para llegar a cubrir la cobertura total, en comparación con las profundidades de 15 y 20 cm (cuadro 2).

Los resultados obtenidos superan lo propuesto por el manual de azoteas verdes alemanas, que plantean que hay éxito sí se alcanza un mínimo de 60% de cobertura, también se reporta que a partir de una profundidad de 7.5 cm se alcanza la expectativa mínima de cobertura (Durham *et al.*, 2007; Getter y Rowe, 2008).

El hecho que en 10 cm de profundidad se hayan registrado los menores porcentajes de cobertura (cuadro 2) podría deberse a que experimentan una mayor fluctuación de temperatura que en aquellos más profundos, reduciéndose la disponibilidad de agua que afectaría el metabolismo básico de las plantas (Boivin *et al.*, 2001). Una mayor temperatura en el sustrato provoca que las plantas puedan sufrir estrés para crecer (Getter y Rowe, 2008).

Getter y Rowe (2008) investigaron el efecto de la profundidad de sustrato en el establecimiento de *Sedum* y evaluando la cobertura absoluta de varias especies, encontraron que conforme la profundidad de sustrato aumentó de 4 a 7 y a 10 cm, la cobertura también aumentó. Esto concuerda con los resultados obtenidos, porque la mayoría de las crasuláceas en un sustrato más profundo tienen, en un menor tiempo, una cobertura mayor.

El hecho que *E. gibbiflora* en 15 cm de profundidad alcanzara el límite de cobertura a los 283 ddp y no en 20 cm (cuadro 2), se puede explicar debido a la mayor

disponibilidad de agua en la parte superior de los sustratos, a pesar de ser menos profundos, tal como lo explica Nektarios *et al.* (2011).

Por otra parte, las especies estudiadas, que son consideradas caméfitas (plantas con yemas que se hallan a menos de 25 cm del suelo) en la clasificación de Raunkiaer (1934, en Durham *et al.*, 2007), se mantuvieron siempre verdes durante el año de estudio independientemente de la temporada, lo que les brindo ventajas para alcanzar el límite en cobertura más rápido (Durham *et al.*, 2007).

Contrario a lo que se ha descrito sobre las especies con hábitos erectos, que podrían estar subrepresentadas en las técnicas de medición con cuadro entramado, *S. dendroideum* es una especie que se reproduce de forma asexual más fácil que otras, permitiéndole cubrir una mayor área en menor tiempo (cuadro 2) (Getter y Rowe, 2009). Esto hace que sea una especie muy agresiva que rompe este patrón.

En general las plantas utilizadas en este estudio se reproducen fácilmente de forma asexual de tallos o de hojas que se han caído sin utilizar enraizantes comerciales, por otro lado asignan más energía hacia el crecimiento rastrero o en entramado que a la inversión de energía para la reproducción sexual (Getter y Rowe 2008). A lo largo del tiempo, las plantas originales se propagaron asexualmente, aumentando de esta forma su cobertura, dichos comportamientos ya han sido mencionados por otros autores (Durham *et al.*, 2007; Dunnett *et al.*, 2008). Esto podría favorecer el crecimiento en cobertura de *Sedum* en comparación con *E. gibbiflora* que a pesar de ser suculentas tienen una menor capacidad de reproducción asexual (cuadro 3).

Dentro de las crasuláceas, Stephenson (2002) reporta que el aumento en los grados de succulencia está relacionado con una mejora en la habilidad de reproducirse de forma asexual, esta habilidad se observó en hojas de *S. dendroideum*, *S. pachyphyllum*, y en tallos de *S. dendroideum*, *S. moranense* y *E. gibbiflora*.

Cuadro 3. Días después de la plantación en que se alcanzó la máxima cobertura.

Entre paréntesis se indica el porcentaje de máxima cobertura.

| Especie | Profundidad (cm) | | |
|-------------------------------|------------------|-----------------|----------------|
| | 10 | 15 | 20 |
| <i>S. dendroideum</i> | 297 ddp (99.25%) | 269 ddp (100%) | 255 ddp (100%) |
| <i>S. moranense</i> | 353 ddp (100%) | 353 ddp (100%) | 339 ddp (100%) |
| <i>S. pachyphyllum</i> | 395 ddp (91%) | 353 ddp (94.4%) | 353 ddp (93%) |
| <i>E. gibbiflora</i> | 241 ddp (73.5%)* | 283 ddp (100%) | 339 ddp (100%) |

*disminución de cobertura por herbivoría.

El crecimiento en cobertura fue sigmoideo en todas las especies y profundidades, como se observa en la figura 22. La fase de establecimiento duró hasta los 31 ddp, la de crecimiento rápido concluyó en promedio a los 215 ddp, a partir de la cual se inició la fase de endurecimiento (Cuadro 4).

Cuadro 4. Inicio de las fases de establecimiento (E) y crecimiento rápido (CR), (ddp) en cobertura de las cuatro especies en las profundidades de 10, 15 y 20 cm.

| Especie | Profundidad (cm) | | | | | |
|-------------------------------|------------------|-----|----|-----|----|-----|
| | 10 | | 15 | | 20 | |
| | E | CR | E | CR | E | CR |
| <i>S. dendroideum</i> | 31 | 213 | 31 | 171 | 31 | 171 |
| <i>S. moranense</i> | 31 | 213 | 31 | 213 | 31 | 213 |
| <i>S. pachyphyllum</i> | 31 | 241 | 31 | 241 | 31 | 241 |
| <i>E. gibbiflora</i> | 31 | 241 | 31 | 213 | 31 | 213 |

La falta de competitividad de las especies para llegar al límite de cobertura, en la menor profundidad, se puede explicar debido a que en algunas temporadas dichos sustratos se ven más afectados por las altas temperaturas en los suelos, dicha temperatura afecta el crecimiento de las plantas. Además, que esto es sinérgico, pues al haber menor cobertura de la planta hay partes del suelo que están más expuestas al sol de forma directa (Getter y Rowe, 2009; Dunnett *et al.*, 2008).

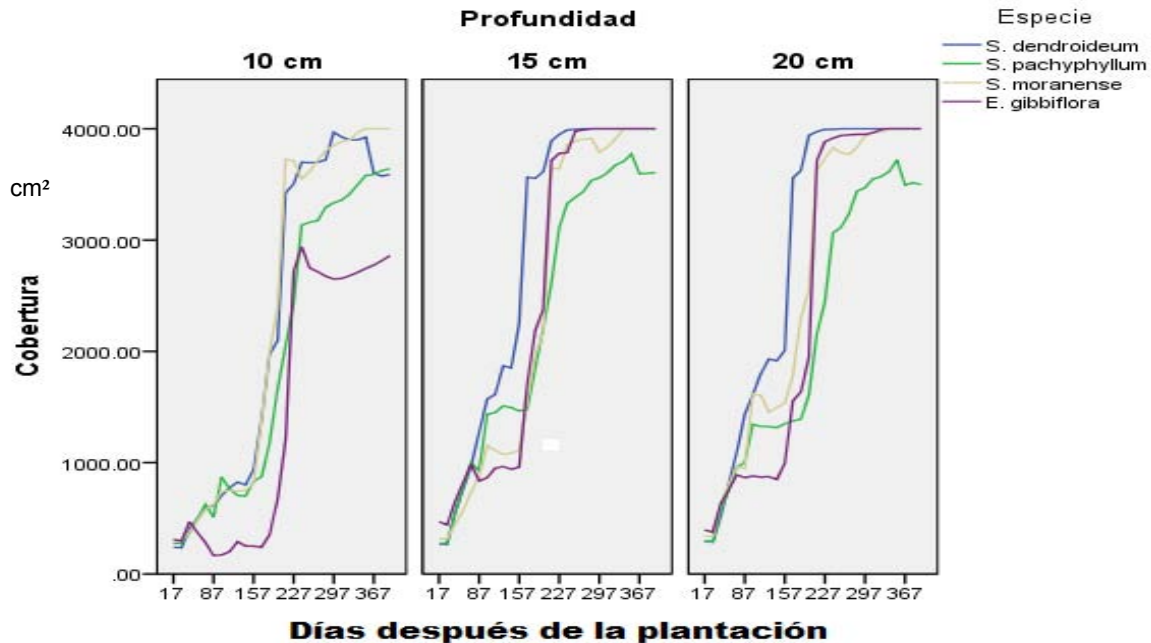


Figura 22. Cobertura de las cuatro especies de crasuláceas en tres distintas profundidades, a través del tiempo.

Las mediciones de cobertura a través del tiempo fueron significativamente distintas $F = 1961.958$ $gl=1, 323$ $p<0.05$. Lo mismo ocurrió entre especies $F= 19.520$ $gl=3, 323$ $p<0.05$, entre profundidades $F =34.011$ $gl=2,323$ $p<0.05$, y en la interacción profundidad-especies $F= 5.1$ $gl=6,323$ $p<0.05$ (ANEXO 1, C).

El análisis Tukey DHS definió que había similitudes entre *S. dendroideum* y *S. moranense*. Por otro lado hubo similitud entre *S. pachyphyllum* y *E. gibbiflora* (Fig. 23). En contraste, estudios anteriores mencionan que solo una de cuatro especies (*Armeria* sp., *Calamintha* sp., *Sedum* sp., *Veronica* sp.) tuvo una diferencia significativa (*Veronica* sp.) (Dunnett *et al.*, 2008)

Entre profundidades fue distinta solamente la de 10 cm; las de 15 y 20 cm fueron similares, esto es lo mismo que se reportó en el 2009 por Getter y Rowe donde las

diferencias se presentaron entre la profundidad menor con respecto a las otras dos (Fig. 24). Otros estudios reportaron que solo el sustrato más profundo se diferenció estadísticamente del sustrato menos profundo (Dunnett *et al.*, 2008).

En la interacción profundidad-especie (Fig. 25), hay interacciones que son similares estadísticamente, siendo *S. dendroideum* en 15 y 20 cm de profundidad la especie con mayor cobertura y *E. gibbiflora* en 10 cm de profundidad la de menor cobertura. Cabe destacar que este último resultado se vio influenciado por la herbivoría de ardillas. Descartando esto, fue *S. pachyphyllum* en todas las profundidades de sustrato la especie con menor cobertura.

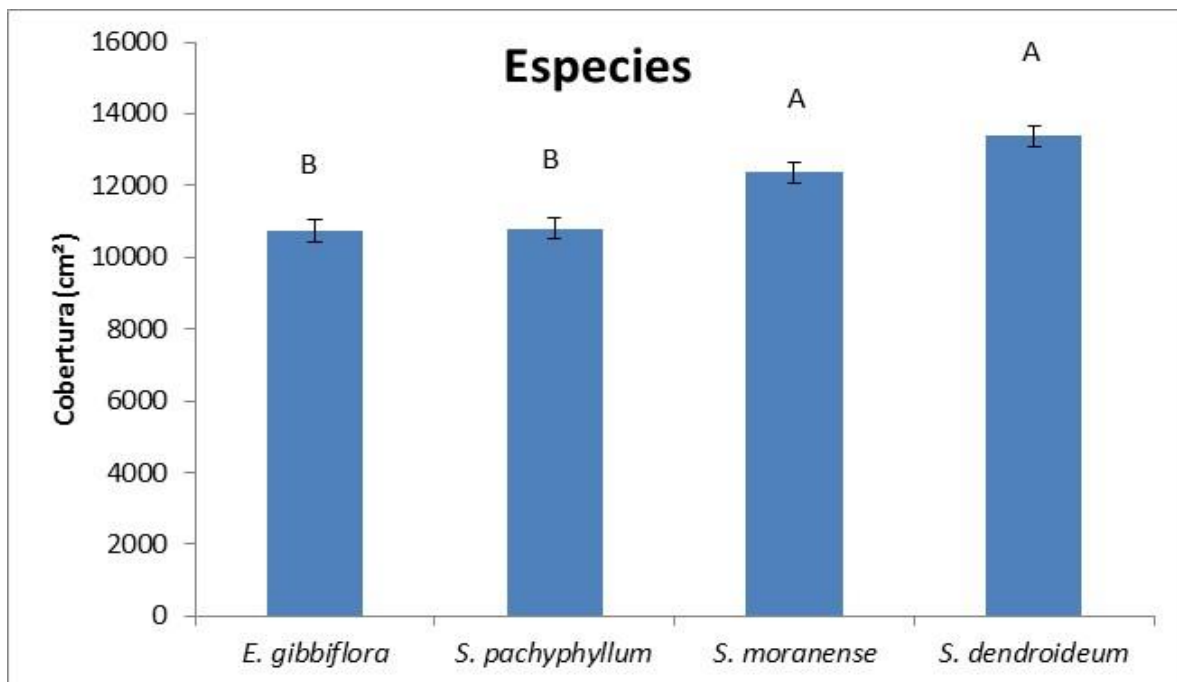


Figura 23. Cobertura promedio \pm SD de las cuatro especies. Letras distintas denotan diferencias significativas.

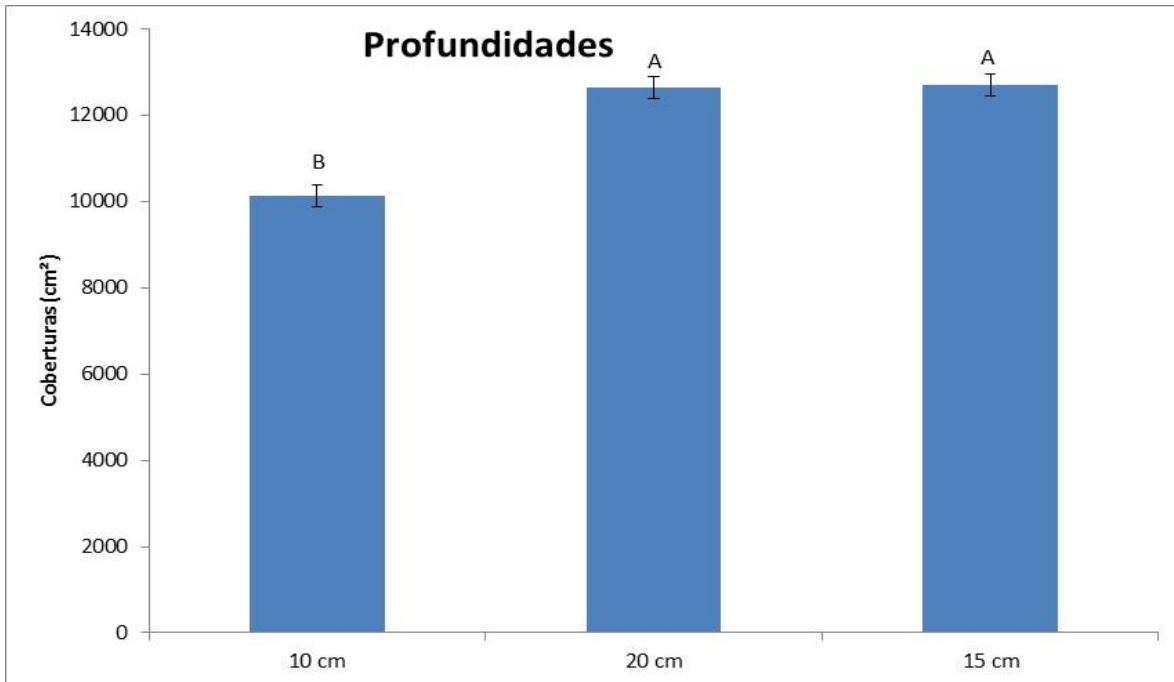


Figura 24. Diferencias y similitudes de cobertura \pm SD en distintas profundidades.

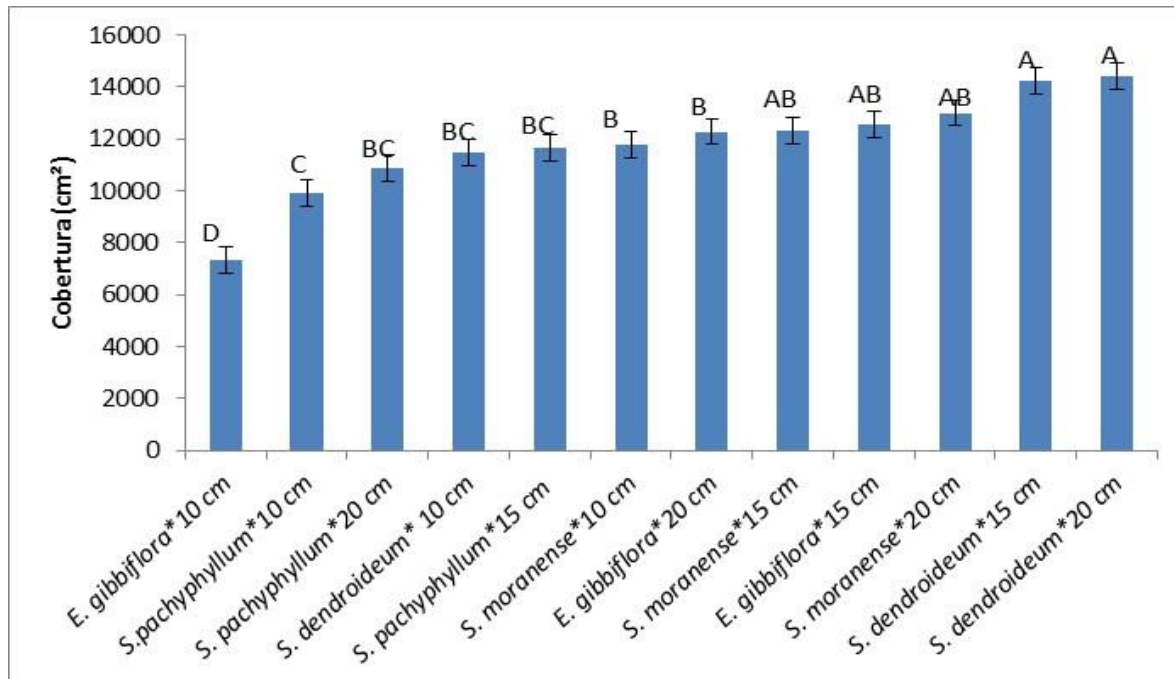


Figura 25. Cobertura \pm SD por especie y profundidad. Letras distintas denotan diferencias significativas.

10.5 Biomasa

S. dendroideum y *E. gibbiflora* obtuvieron su mayor biomasa en 20 cm de profundidad. Esto es congruente con lo que previamente se ha publicado, donde han encontrado que la biomasa también se vio afectada por la profundidad y la disponibilidad de los recursos (Nektarios *et al.* 2011, Dunnett *et al.*, 2008, Thuring *et al.* 2010).

Por otro lado, el estudio de Nektarios *et al.* (2011) señala que la biomasa del tallo y la raíz de *Dianthus fruticosus* sub. *fruticosus* fueron similar en los tratamientos: tipo de sustrato, agendas de riego y distintas profundidades, y que a partir de un sustrato de 6 cm de profundidad hay mejores condiciones de crecimiento para las plantas, aumentando la retención de humedad en el suelo durante el estrés por sequía.

Sin embargo, *S. pachyphyllum* registró su mayor biomasa en 15 cm y *S. moranense* en 10 cm de profundidad (Fig. 26), lo que es contradictorio con lo reportado por varios autores (Durham *et al.*, 2007; Getter y Rowe, 2008; Nektarios *et al.*, 2011; Thuring *et al.*, 2010). Sin embargo, Thuring *et al.* (2010) también encontraron que la especie *Petrorhagia saxifraga* tuvo mayor biomasa a menor profundidad, lo que atribuyen a la eficiencia de la especie en aprovechar la disponibilidad de agua, de lo que concluye, junto con Dunnett (2008), que es el agua y no la profundidad la que ayuda al crecimiento de las plantas.

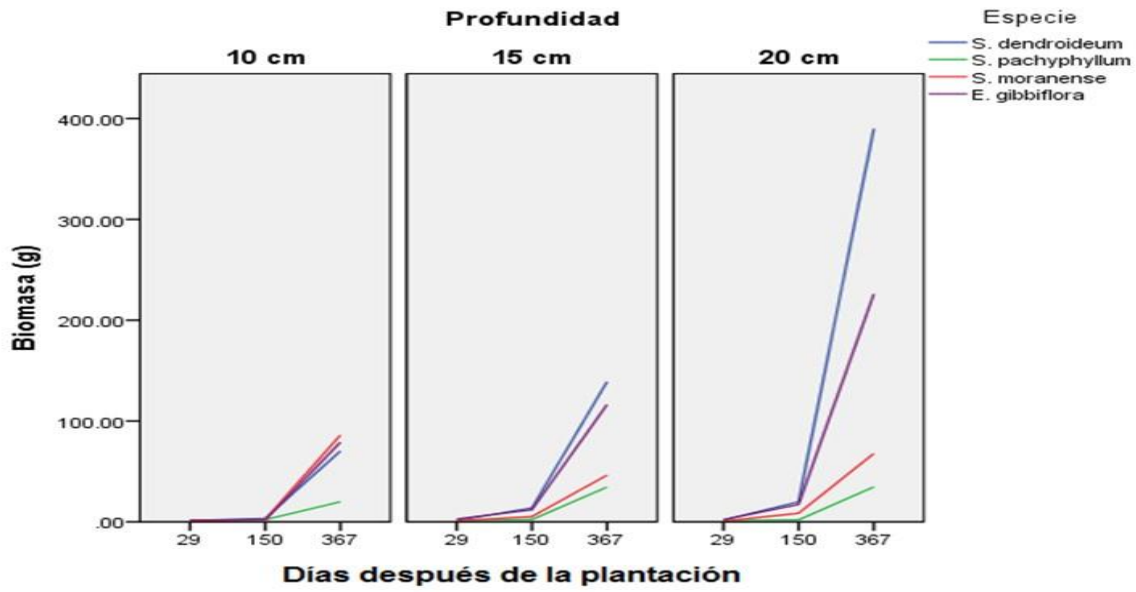


Figura 26. Biomasa de las cuatro especies en tres distintas profundidades a lo largo del tiempo.

El bajo rendimiento de biomasa de *S. pachyphyllum* en 20 cm en comparación a 15 cm, al igual que *S. moranense* en 15 y 20 cm comparado con 10 cm se puede explicar por posibles periodos de sequía posteriores a las fases de endurecimiento de las plantas (Thuring *et al.*, 2010).

Con una $F= 69.354$ $gl=1,311$, $p<0.05$ hubo diferencias de biomasa a lo largo del tiempo. Las diferencias también se presentaron entre profundidades $F= 5.820$ $gl=2,311$, $p<0.05$, entre especies $F= 6.517$ $gl= 3,311$, $p<0.05$, y entre la interacción de estas dos últimas $F= 2.306$ $gl=6,311$ $p<0.05$ (ANEXO 1, D).

El análisis de Tukey estableció similitudes entre las medias de las especies *S. dendroideum* y *E. gibbiflora*, a su vez entre las medias de *E. gibbiflora* y *S.*

moranense, así como entre las medias de *S. moranense* y *S. pachyphyllum* (Fig. 27).

La biomasa producida en profundidades de 15 y 10 cm fue similar, mientras que la biomasa total de 20 cm de profundidad fue significativamente distinta (Fig. 28).

Con respecto a la interacción entre las profundidades y las especies, hubo una gran similitud entre tratamientos, siendo *E. gibbiflora* y *S. dendroideum*, ambas en 20 cm de profundidad, distintas a los otros tratamientos (Fig. 29). En estos dos casos se presenta el patrón de a mayor profundidad, mayor biomasa. (Nektarios *et al.*, 2011; Dunnett *et al.*, 2008)

Se ha propuesto que el aumento en la biomasa fue por el aumento de humedad de los sustratos más profundos (Nektarios *et al.*, 2011). Posiblemente cambiando el tipo de sustrato se pueda obtener un mejor rendimiento en biomasa, como se encontró en otros estudios donde el tipo de sustrato el que afecta el aumento o disminución de biomasa en los tallos (Thuring *et al.*, 2010).

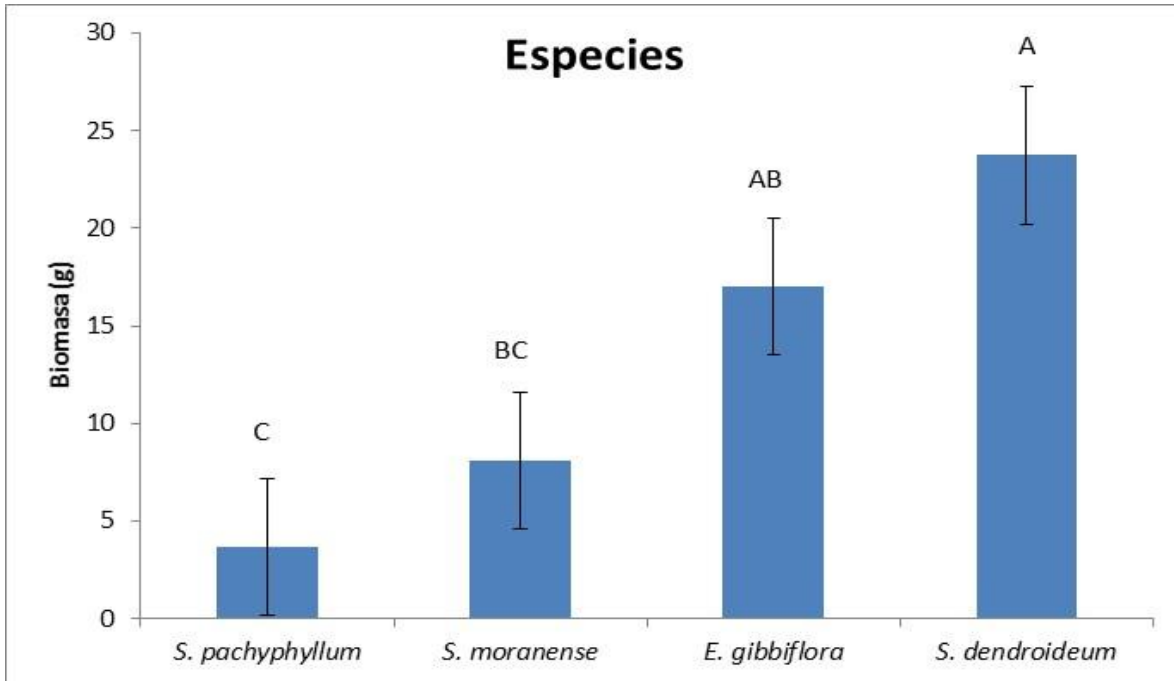


Figura 27. Biomasa \pm SD de las cuatro especies. Letras distintas indican diferencias significativas.

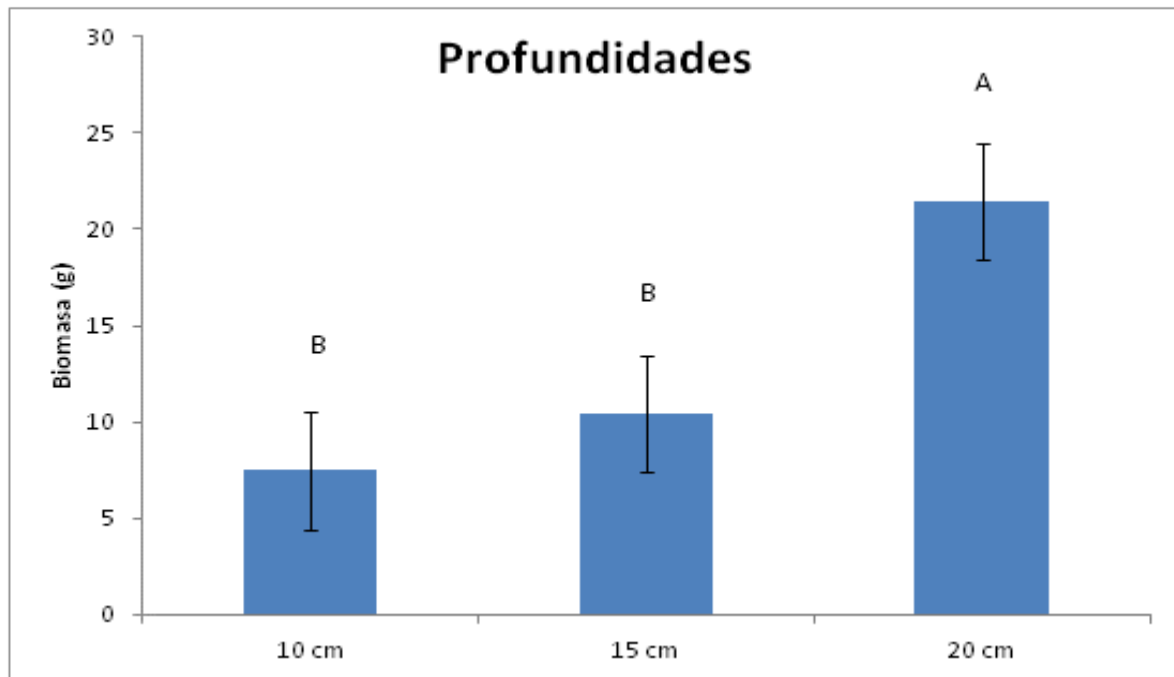


Figura 28. Las profundidades que no están conectadas por la misma letra son distintas estadísticamente. Biomasa \pm SD de las distintas profundidades.

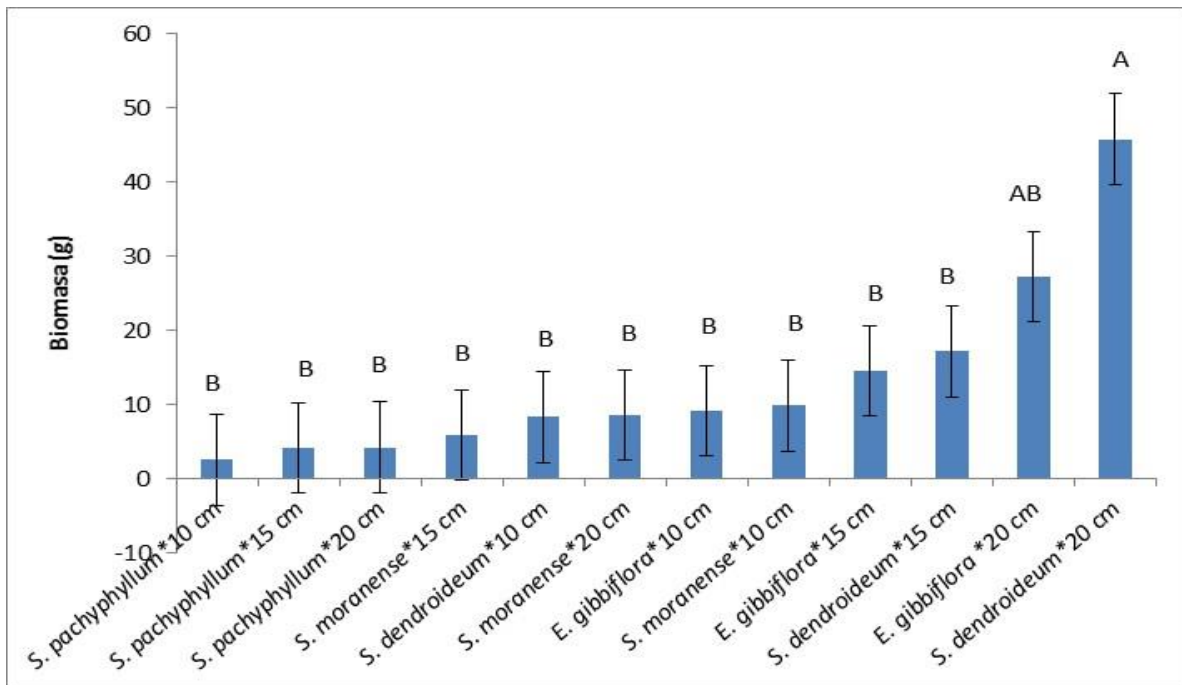


Figura 29. Biomasa \pm SD de las interacciones especie-profundidad. Letras distintas denotan diferencias significativas.

11. Conclusiones

Se cumplió que en al menos una profundidad de sustrato hubo mayor crecimiento y cobertura en las plantas, desechándose la hipótesis nula.

Todas las plantas en este estudio sobrevivieron y se establecieron a los 31 ddp en las tres profundidades.

Sedum dendroideum en la interacción especie-profundidad tuvo la mayor altura y cobertura en 15 cm de profundidad, y la mayor biomasa en 20 cm de profundidad. Los mayores diámetros del tallo los registró *Echeveria gibbiflora* en 20 cm de profundidad.

Sedum dendroideum fue la especie que alcanzó el límite de cobertura en el menor tiempo (255 ddp) en 20 cm de profundidad.

A partir de los objetivos se determinó que:

- a. Una profundidad de sustrato mayor a 15 cm de profundidad no brinda ningún beneficio en términos de altura, diámetro del tallo y cobertura para *Sedum dendroideum* y *Sedum pachyphyllum*.
- b. *Echeveria gibbiflora* no obtienen ningún beneficio en término de altura y cobertura en un sustrato mayor a 15 cm de profundidad.
- c. *Sedum moranense* no obtiene ningún beneficio en término de diámetro del tallo y cobertura en un sustrato mayor a 15 de profundidad.

- d. Una profundidad de sustrato mayor a 10 cm no brinda ningún beneficio en biomasa para *Sedum moranense*, *Echeveria gibbiflora* y *Sedum pachyphyllum*.
- e. *Sedum moranense* registró las alturas más altas en 20 cm de profundidad.

Al no presentarse diferencias significativas entre las profundidades de sustrato, en las distintas variables de crecimiento evaluadas, es preferible utilizar la de menor volumen porque representa un menor costo.

Los resultados de biomasa y cobertura se pueden extrapolar a cualquier tamaño de superficie ya que las plantas de cada especie tuvieron un crecimiento uniforme.

La herbivoría de *E. gibbiflora* es debido a que su ápice es dulce en etapas tempranas y posteriormente no, de acuerdo a Jerónimo Reyes (com. Pers.).

12. Propuesta

Incrementar los estudios con más especies nativas xerófitas para las azoteas verdes extensivas de modo que pueda conocerse si son útiles en términos de los beneficios ecosistémicos que se esperan, entre ellos el establecimiento de la microfauna.

13. Literatura consultada

Aránguez E., J. M. Ordóñez, J. Serrano, N. Aragonés, R. Fernández-Patier, A. Gandarillas e I. Galán. 1999. Contaminante atmosféricos y su vigilancia. *Revista Española de Salud Pública* 73(2): 165-175

Arellano L. E. A. 2012. Capacidad de retención de hidrocarburos aromáticos policíclicos y metales pesados en una azotea verde extensiva. Tesis de Licenciatura (Biología), Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. México. D. F. 60pp

Boivin, M., M. Lamy, A. Gosselin, y B. Dansereau. 2001. Effect of artificial substrate depth on freezing injury of six herbaceous perennials grown in a green roof system. *HortTechnology* 11(3): 409- 412

Brenneisen S. 2005. Green roofs—recapturing urban space for wildlife—a challenge for urban planning and environmental education. En: Proceedings of the Third North American Green Roof Conference: Greening Rooftops for Sustainable Communities, del 4 al 6 de mayo de 2005, Washington D.C., E.U.A. pp: 449–456

Britton N. L. y J. N. Rose. 1905. Crassulaceae. En: North America Flora. *The New York Botanical Garden* 22(1): 69-7

Bustan A. y E. E. Goldschmidt. 1998. Estimating the cost of flowering in a grapefruit tree. *Plant, Cell & Environment* 21(2): 217-224

Carrazana P. H. 2003. Naturación urbana y de la arquitectura. Desarrollo de una propuesta, como modelo, en la ciudad de La Paz, Bolivia: Techo verde para el teatro

Modesta Sanjinez de la Casa de la Cultura. Tesina de Maestría en Medio Ambiente Urbano y Sostenibilidad. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España 12 pp

Carter T. y T. Rasmussen. 2006. Evaluation of the hydrologic behavior of green roofs. *Journal of the American Water Resources Association* 42: 1261–1294

Carter T. y A. Keeler. 2008. Life-cycle cost–benefit analysis of extensive vegetated roof systems. *Journal of Environmental Management* 87: 350-363

Clark C., P. Adriaens y B. Talbot. 2008. Green roof valuation: A probabilistic economic analysis of environmental benefits. *Environ. Sci. Technol.* 42: 2155- 2161

Clausen, R. T. 1959. Sedum of the Trans-Mexican Volcanic Belt. CornellUniversityPress. Nueva York. p: 259- 257

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). Malezas de México. Página en red: <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/crassulaceae/sedum-moranense/fichas/ficha.htm#1>. Consultada noviembre 2015.

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 2008. NaturaLista. Página en red: <http://conabio.inaturalist.org/taxa/153992-Echeveria-gibbiflora>. Consultada 05 noviembre 2015.

CrassulaceaeWebsite. 1997a. Página en red: www.crassulaceae.com. Consultada 25 noviembre 2013.

CrassulaceaeWebsite. 1997b. Página en red: www.crassulaceae.com. Consultada 20 septiembre 2013.

CrassulaceaeWebsite. 1997c. Página en red: www.crassulaceae.com. Consultada 15 octubre 2015

Dumroese K. R., Douglass F. J. y Wilkinson K. M. 2012. Fases de cultivo: Establecimiento y crecimiento rapido. En: Contardi, L.; Gonda, H., (coord.) Produccion de plantas en viveros forestales. Buenos Aires: Consejo Federal de Inversiones; Comodoro Rivadavia: Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco UNPSJB; Comodoro Rivadavia: Centro de Investigacion y Extension Forestal Andino Patagonico, Argentina. p. 133-142.

Dunnett N., Nagase A., y Hallam A. 2008. The dynamics of planted and colonising species on a green roof over six growing seasons 2001-2006: influence of substrate depth. *Urban Ecosystem* 11: 373-384

Dunnett N. y A. Nolan. 2004. The effect of substrate depth and supplementary watering on the growth of nine herbaceous perennials in a semi-extensive green roof. *ISHS Acta Horticulturae* 643: 305- 309

Durham A. K., D. B. Rowe y C. L. Rugh. 2007. Effect of substrate depth on initial growth, coverage, and survival of 25 succulent green roof plant taxa. *HortScience* 42 (3) 588- 595

Getter K. L. y D. B. Rowe. 2007. Effect of substrate depth and planting season on *Sedum* plug survival on green roof. *J. Environ. Hort.* 25 (2): 95-99

Getter K. L. y D. B. Rowe. 2008. Media depth influences *Sedum* green roof establishment. *Urban Ecosystems* 11 (4): 361-372

Getter K. L. y D. B. Rowe. 2009. Substrate depth influences *Sedum* plant community on a green roof. *HortScience* 44 (2): 401-407

Guidelines for the planning, execution and upkeep of green-roof sites. 2002. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau E.V.-FLL. 1era edición. Bonn, Alemania.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) 2009. Página en red: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/ficha.aspx?upc=702825292973>.

Consultada: 25 febrero 2016.

Jiménez C. B. 2001. La contaminación ambiental en México causas efectos y tecnologías apropiadas. Limusa. México. 86 pp.

Kim H. H. 1992. Urban Heat Island. *International Journal of Remote Sensing* 13 (12)

Kim K. 2004. The application of the biosphere reserve concept to urban areas: the case of green rooftops for habitat network in Seoul. *Annals of the New York Academy of Sciences*. *Annals of the New York Academy Science* 1023: 187–214

Kumar R. y S. Kaushik. 2005. Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings. *Building and Environment* 40: 1505-1511

Li J., G. Zhang, S. Qi, G. Liu y X. Peng. 2006. Source seasonality of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in a subtropical city, Guangzhou, South China. *Science of the Total Environment* 355: 145-155

Magil J. D., K. Midden, J. Groninger y M. Therrell. 2011. A history and definition of green roof technology with recommendations for future research. Open SIUC. Disponible en [\[http://opensiuc.lib.siu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1132&context=gs_rp\]](http://opensiuc.lib.siu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1132&context=gs_rp) consultada 29 de febrero del 2016

Manaham S. 2007. Introducción a la química ambiental. 1era ed. Editorial Reverté. España.

MSU. Michigan State University. 2000. Green Roof Research. http://www.hrt.msu.edu/greenroof/research-projects/plant_evaluations.html. Consultada Octubre 2015

Monterusso M.A., D. B. Rowe y C.L. Rugh. 2005. Establishment and persistence of *Sedum* spp. and native taxa for green roof applications. *HortScience* 40: 391-396

Nardini A., S. Andri y M. Crasso. 2012. Influence of substrate depth and vegetation type on temperature and water runoff mitigation by extensive green roof: shrubs versus herbaceous plants. *Urban Ecosystems* 15(3): 697-708

Nektarios A. P., Amountzias I., Kokkinou I. y Ntoulas N. 2011. Green roof substrate type and depth affect the growth of the native species *Dianthus fruticosus* under reduced irrigation regimens. *HortScience* 46(8): 1208-1216

Nelson P. V. 1998. Greenhouse operation and management. 5ta edición. Prentice-Hall. EUA. Nueva Jersey

Ntoulas N., P. A. Nektarios, K. Spaneas y N. Kadoglou. 2012. Semi-extensive green roof substrate type and depth effects on *Zoysia matrella* 'Zeon' growth and drought tolerance under different irrigation regimes. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science* 62 (1): 165-173

Oberndorfer E., J. Lunhholm, B. Bass, R. R. Coffman, H. Doshi, N. Dunnett, S. Gaffin, M. Köhler, K. Y. Liu y B. Rowe. 2007. Green roof as urban ecosystems: ecological, structures, functions and services. *BioScience* 57: 823-833

Peck S.W., Callaghan C., Kuhn M., Bass B., 1999. Greenbacks from Green Roofs: Forging a New Industry in Canada. Canada Mortgage and Housing Corporation. Disponible en [<http://www.greenroofs.org/pdf/Greenbacks.pdf>] Consultada 4 de marzo del 2013.

Pérez-Calix E. y I. S. Franco Martínez. 2004. Crasuláceas. En: Abisaí J. García-Mendoza, María de Jesús Ordoñez y Miguel Briones-Salas (coord. y eds.) Biodiversidad de Oaxaca, Instituto de biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza, World Wildlife Fund. México. p: 209- 218.

Researchgate.net. 2008.
http://www.researchgate.net/publication/255573732_Effects_of_green_roof_growt_medium_depths_on_Sedum_immergrauch_establishment. Consultada 18 de noviembre del 2015

Rodríguez W. y L. Dietrich. 2006. Análisis de crecimiento vegetal. 1era ed. Universidad de Costa Rica. Costa Rica.

Rowe D. B., K. L. Getter y A. K. Durhman. 2012. Effect of green roof media depth on Crassulacean plant succession over seven years. *Landscape and Urban Planning* 104 (3-4): 310-319

Sayed O. H., M. J. Earnshaw, y M. Cooper. 1994. Growth water relations, and CAM induction in *Sedum album* in response to water stress. *Bio. Plant* 36: 383-388

SMA, Secretaria de Medio Ambiente. Gobierno del Distrito Federal. 2009. Inventarios de áreas verdes. Dirección de reforestación urbana, parques y ciclovías. Página en red: www.sma.df.gob.mx. Consultada 28 de mayo del 2013.

Stephenson R. 2002. *Sedum: Cultivated stonecrop*. Timber Press. EUA. Oregon.

Susca T., S.R. Gaffin y G.R. Dell'Osso. 2011. Positive effects of vegetation: Urban heat island and green roof. *Environmental Pollution* 159: 2119-2126

Thuring, C.E., R.D. Berghage y D.J. Bettie. 2010. Green roof plant responses to different substrate types and depths under various drought conditions. *HortTechnology* 20:395–401.

TNAU Agritech Portal. 2015. Página en red: <http://agridr.in/tnauEAgri/eagri50/PPHY261/lec18.pdf> Consultada noviembre 2015

Tovar J.E. 2000 *Plant Physiology*, 5ta ed. SinauerAssociates. Sunderland, Massachusetts.

VanWoert N. D., D. R. Rowe, J. A. Andrese, C. L. Rugh y L. Xiao. 2005. Watering regimen and green roof substrate design affect *Sedum* plant growth. *HortScience* 40 (3) 659-664

VanWoert N. D., D. R. Rowe, J. A. Andresen, C. L. Rugh, R. T. Fernandez y L. Xiao.
2005b. Green roof stormwater retention: Effects of roof surface, slope, and media
depth. *J. Environ. Qual.* 34 (3): 1036-1044

14. Anexo I

A

Pruebas de los efectos inter-sujetos

Variable dependiente: altura

| Origen | Suma de cuadrados tipo III | gl | Media cuadrática | F | Sig. |
|-----------------------|----------------------------|------|------------------|----------|------|
| Modelo corregido | 49803227.086 ^a | 12 | 4150268.924 | 1304.732 | .000 |
| Intersección | 3167883.834 | 1 | 3167883.834 | 995.896 | .000 |
| Fecha | 19172059.333 | 1 | 19172059.333 | 6027.173 | .000 |
| Especie | 25631273.543 | 3 | 8543757.848 | 2685.925 | .000 |
| Profundidad | 2773904.485 | 2 | 1386952.243 | 436.020 | .000 |
| especie * profundidad | 1773585.773 | 6 | 295597.629 | 92.928 | .000 |
| Error | 9024318.424 | 2837 | 3180.937 | | |
| Total | 197152258.536 | 2850 | | | |
| Total corregida | 58827545.510 | 2849 | | | |

a. R cuadrado = .847 (R cuadrado corregida = .846)

B

Pruebas de los efectos inter-sujetos

Variable dependiente: diámetro

| Origen | Suma de cuadrados tipo III | gl | Media cuadrática | F | Sig. |
|-----------------------|----------------------------|------|------------------|----------|------|
| Modelo corregido | 632785.757 ^a | 12 | 52732.146 | 1605.929 | .000 |
| Intersección | 112655.799 | 1 | 112655.799 | 3430.871 | .000 |
| Fecha | 7516.444 | 1 | 7516.444 | 228.909 | .000 |
| Especie | 572288.093 | 3 | 190762.698 | 5809.575 | .000 |
| Profundidad | 18226.244 | 2 | 9113.122 | 277.535 | .000 |
| especie * profundidad | 31428.577 | 6 | 5238.096 | 159.523 | .000 |
| Error | 93155.488 | 2837 | 32.836 | | |
| Total | 1449463.800 | 2850 | | | |
| Total corregida | 725941.245 | 2849 | | | |

a. R cuadrado = .872 (R cuadrado corregida = .871)

C

Pruebas de los efectos inter-sujetos

Variable dependiente: cobertura

| Origen | Suma de cuadrados tipo III | gl | Media cuadrática | F | Sig. |
|-----------------------|----------------------------|-----|------------------|----------|------|
| Modelo corregido | 600776511.427 ^a | 12 | 50064709.286 | 176.595 | .000 |
| Intersección | 235229.115 | 1 | 235229.115 | .830 | .363 |
| Fecha | 556214564.998 | 1 | 556214564.998 | 1961.958 | .000 |
| Especie | 16602020.238 | 3 | 5534006.746 | 19.520 | .000 |
| Profundidad | 19284064.286 | 2 | 9642032.143 | 34.011 | .000 |
| especie * profundidad | 8675861.905 | 6 | 1445976.984 | 5.100 | .000 |
| Error | 91570402.859 | 323 | 283499.699 | | |
| Total | 2569968100.000 | 336 | | | |
| Total corregida | 692346914.286 | 335 | | | |

a. R cuadrado = .868 (R cuadrado corregida = .863)

D

Pruebas de los efectos inter-sujetos

Variable dependiente: biomasa

| Origen | Suma de cuadrados tipo III | gl | Media cuadrática | F | Sig. |
|-----------------------|----------------------------|-----|------------------|--------|------|
| Modelo corregido | 115023.967 ^a | 12 | 9585.331 | 9.532 | .000 |
| Intersección | 24096.291 | 1 | 24096.291 | 23.962 | .000 |
| Fecha | 69743.798 | 1 | 69743.798 | 69.354 | .000 |
| Profundidad | 11705.214 | 2 | 5852.607 | 5.820 | .003 |
| Especie | 19659.746 | 3 | 6553.249 | 6.517 | .000 |
| profundidad * especie | 13915.209 | 6 | 2319.201 | 2.306 | .034 |
| Error | 312747.254 | 311 | 1005.618 | | |
| Total | 483555.783 | 324 | | | |
| Total corregida | 427771.221 | 323 | | | |

a. R cuadrado = .269 (R cuadrado corregida = .241)