

**UNIVERSIDAD METROPOLITANA**  
**ESCUELA GRADUADA DE ASUNTOS AMBIENTALES**  
**SAN JUAN, PUERTO RICO**

**EFFECTIVIDAD DE LOS SISTEMAS DE TECHOS CON CUBIERTA VEGETAL  
PARA LA MITIGACIÓN DEL CALENTAMIENTO Y MANEJO DE LA  
ESCORRENTÍA DE EN LAS ZONAS URBANAS**

Requisito parcial para la obtención del  
Grado de Maestría en Ciencias en Gerencia Ambiental  
en Evaluación y Manejo de Riesgo Ambiental

Por  
Darisabel Maldonado Cortés

18 de diciembre de 2009

## **DEDICATORIA**

*A Dios, por estar a mi lado en todo momento dándome las fuerzas necesarias para continuar luchando día tras día y lograr mis metas trazadas.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Debo agradecerle a la compañía SPECCO Environmental por la donación de los materiales y mano de obra para la construcción del sistema de techo con cubierta vegetal, utilizado en este proyecto, y por haberme brindado la oportunidad de realizar esta investigación de tesis. Quiero agradecerle a mi director de tesis, el Dr. Nefthalí García Martínez, cuyo invaluable y generoso apoyo e interés hicieron posible la culminación de esta investigación. Asimismo, por su valiosa dirección, sus ideas y sugerencias para el análisis de resultados. Deseo expresar mi reconocimiento a la Dra. Beatriz Zayas y el Dr. Fernando Abruña, miembros de mi comité de tesis, por sus valiosas aportaciones, además de sus comentarios y sugerencias, los cuales contribuyeron al mejoramiento y ordenamiento del presente documento.

Le agradezco a mi familia por apoyarme y brindarme comprensión en todo momento, y a todas las personas que colaboraron de una forma u otra para la culminación de este trabajo de tesis de grado, que pone fin a un largo camino de estudio y sacrificio con el fin de obtener una carrera profesional.

## TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS .....	vi
LISTAS DE FIGURAS .....	vii
LISTA DE APÉNDICES .....	ix
LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIACIONES .....	x
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT.....	xii
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN .....	1
Trasfondo del problema .....	1
Problema de estudio .....	3
Justificación del estudio .....	5
Pregunta de investigación .....	7
Metas y Objetivos .....	7
CAPÍTULO II: REVISIÓN DE LITERATURA .....	8
Trasfondo del histórico .....	8
Marco teórico .....	10
Estudio de casos .....	31
Marco legal .....	34
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA .....	41
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	48
Establecimiento de cubierta vegetal .....	48
Eventos de lluvia .....	49
Retención de escorrentía .....	49
Fluctuaciones en temperatura .....	51
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	58
LITERATURA CITADA .....	62

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Retención de agua de lluvia para el techo con cubierta vegetal y el techo con cubierta de aislación sintética .....	67
Tabla 2.	Temperatura ambiental y temperatura interior y exterior registradas durante la mañana para mes de mayo .....	72
Tabla 3.	Temperatura ambiental y temperatura interior y exterior registradas durante el mediodía para el mes de mayo .....	73
Tabla 4.	Temperatura ambiental y temperatura interior y exterior registradas durante la tarde para el mes de mayo .....	74
Tabla 5.	Temperatura ambiental y temperatura interior y exterior registradas durante la mañana para el mes de agosto .....	75
Tabla 6.	Temperatura ambiental y temperatura interior y exterior registradas durante el mediodía para el mes de agosto .....	76
Tabla 7.	Temperatura ambiental y temperatura interior y exterior registradas durante la tarde para el mes de agosto .....	77
Tabla 8.	Temperatura ambiental y temperatura interior y exterior registradas durante la mañana para el mes de noviembre .....	78
Tabla 9.	Temperatura ambiental y temperatura interior y exterior registradas durante el mediodía para el mes de noviembre .....	79
Tabla 10.	Temperatura ambiental y temperatura interior y exterior registradas durante la tarde para el mes de noviembre .....	80
Tabla 11.	Temperatura ambiental y temperatura interior y exterior registradas durante la mañana para el mes de marzo .....	81
Tabla 12.	Temperatura ambiental y temperatura interior y exterior registradas durante el mediodía para el mes de marzo .....	82
Tabla 13.	Temperatura ambiental y temperatura interior y exterior registradas durante la tarde para el mes de marzo .....	83

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Componentes básicos de un sistema con cubierta vegetal extensiva..	85
Figura 2.	Localización del área de estudio en la zona urbana de San Juan.....	86
Figura 3.	Diagrama representativo de un sistema de techo con cubierta vegetal y un techo convencional .....	87
Figura 4.	Comparación mensual de la precipitación registrada en el estudio.....	88
Figura 5.	Retención del sistema con cubierta vegetal como función de la precipitación durante el periodo de estudio.....	89
Figura 6.	Porcentaje de retención del sistema con cubierta vegetal como función de la precipitación durante el periodo de estudio.....	90
Figura 7.	Escorrentía para el sistema con cubierta vegetal y sistema con cubierta de aislación sintética como función de la precipitación durante el periodo de estudio.....	91
Figura 8.	Comparación de temperaturas interiores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante la mañana para el mes de mayo.....	92
Figura 9.	Comparación de temperaturas exteriores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante la mañana para el mes de mayo.....	93
Figura 10.	Comparación de temperaturas interiores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante el mediodía para el mes de mayo.....	94
Figura 11.	Comparación de temperaturas exteriores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante el mediodía para el mes de mayo.....	95
Figura 12.	Comparación de temperaturas interiores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante la tarde para el mes de mayo.....	96
Figura 13.	Comparación de temperaturas exteriores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante la	

	tarde para el mes de mayo.....	97
Figura 14.	Comparación de temperaturas interiores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante la mañana para el mes de agosto.....	98
Figura 15.	Comparación de temperaturas exteriores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante la mañana para el mes de agosto.....	99
Figura 16.	Comparación de temperaturas exteriores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante el mediodía para el mes de agosto.....	100
Figura 17.	Comparación de temperaturas interiores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante el mediodía para el mes de agosto.....	101
Figura 18.	Comparación de temperaturas exteriores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante la tarde para el mes de agosto.....	102
Figura 19.	Comparación de temperaturas interiores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante la tarde para el mes de agosto.....	103
Figura 20.	Comparación de temperaturas interiores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante la mañana para el mes de noviembre.....	104
Figura 21.	Comparación de temperaturas exteriores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante la mañana para el mes de noviembre.....	105
Figura 22.	Comparación de temperaturas interiores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante el mediodía para el mes de noviembre.....	106
Figura 23.	Comparación de temperaturas exteriores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante el mediodía para el mes de noviembre.....	107
Figura 24.	Comparación de temperaturas exteriores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante la tarde para el mes de noviembre.....	108
Figura 25.	Comparación de temperaturas interiores entre cubierta vegetal y	

	cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante la tarde para el mes de noviembre.....	109
Figura 26.	Comparación de temperaturas exteriores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante la mañana para el mes de marzo.....	110
Figura 27.	Comparación de temperaturas interiores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante la mañana para el mes de marzo.....	111
Figura 28.	Comparación de temperaturas interiores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante el mediodía para el mes de marzo.....	112
Figura 29.	Comparación de temperaturas exteriores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante el mediodía para el mes de marzo.....	113
Figura 30.	Comparación de temperaturas exteriores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante la tarde para el mes de marzo.....	114
Figura 31.	Comparación de temperaturas interiores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante la tarde para el mes de marzo.....	115



## **LISTA DE APÉNDICES**

Apéndice 1. Fotos de la construcción del sistema con cubierta vegetal.....	116
--	-----

## **LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIACIONES**

**BMP**= Best Management Practices

**CAA**= Clean Air Act

**CAM**= Crassulacean Acid Metabolism

**CWA**= Clean Water Act

**EPA**= U.S. Environmental Protection Agency

**NCR**= National Council of Research

**NPDES**= National Pollution Discharge Elimination System

**PCV**= Polyvinyl Chloride

## RESUMEN

Las ciudades enfrentan el problema del efecto de calentamiento como resultado de la acumulación de calor en las masas urbanas. Además, experimentan el aumento en el flujo de la escorrentía de agua de lluvia a consecuencia del aumento en las superficies impermeables que evitan la infiltración del agua al terreno, según la vegetación es reemplazada como resultado de la expansión urbana. Una alternativa para recobrar los espacios verdes perdidos, disminuir las fluctuaciones en temperatura de los edificios y reducir el flujo de la escorrentía es mediante la aplicación de un techo con cubierta vegetal, el cual retiene y reduce la escorrentía, al igual que disminuye las temperaturas en comparación con un techo convencional. Construimos una cubierta vegetal en el techo de una residencia del área urbana de San Juan, Puerto Rico. Monitoreamos las variables de temperatura y precipitación entre mayo de 2008 y abril de 2009 para determinar la eficiencia del sistema en cuanto al manejo de la escorrentía y la mitigación en las temperaturas urbanas. El tratamiento con cubierta vegetal retuvo 56.6%, del total de precipitación anual (1895.3 mm), mientras que el techo de referencia perdió 3.33%, a través de la evaporación. La retención total de precipitación puede atribuirse a la distribución en la caída de lluvia en la zona, el grosor del medio de crecimiento, y la membrana de drenaje instalada en el sistema del techo. Al analizar la eficiencia en cuanto a las temperaturas exteriores, los resultados mostraron que el sistema con cubierta vegetal con un promedio de 83.2 °F durante el verano reduce de forma más eficaz la temperatura de una estructura, en comparación con el techo de referencia el cual registró un promedio de 105.2°F. Los sistemas de techo verde pueden moderar el flujo de calor, a través de la superficie del techo por medio de la sombra, aislación, el proceso de evapotranspiración, y el efecto de masa termal. El establecimiento de sistemas con cubierta vegetal en la superficie de los techos es una alternativa viable ambientalmente para reducir las fluctuaciones en temperatura y manejo del agua de lluvia en las zonas urbanas.

## ABSTRACT

Cities face the problem of heating effect resulting from the accumulation of heat in the urban masses. Also, experiment and the flow of stormwater runoff resulting from the increase in the impervious surfaces that prevents the infiltration of water to the ground as vegetation is replaced as a result of urban spread. An alternative to recover the lost green space, reduce temperature fluctuations in buildings and decrease the flow of runoff is through the application of green roof, which retains and reduces runoff, and decrease the temperatures compared with a conventional roof. We constructed a green roof in an existing structure in the urban area of San Juan, Puerto Rico. We monitored the variations in temperature and precipitation between May 2008 and April 2009, to assess its efficiency in the management of stormwater runoff and urban temperatures mitigation. The green roof retained 56.6% or 796.4 mm of total annual rainfall (1895.3 mm), while the reference roof lost 3.33%, or 63.1 mm through evaporation. The total retention of stormwater can be attributed to the rainfall distribution, growth medium thickness, and membrane drainage system installed in the roof. Analyzing the green roof efficiency, the results showed an average of 83.2 °F during the summer, demonstrating that green roofs are more effective in reducing the exterior temperature of a structure, compared with a reference roof that showed an average of 105.2 ° F. The green roof systems can moderate the heat flow by the roof surface through the shade, insulation, evapotranspiration process and the effect of thermal mass. The establishment of green roof system is a viable alternative to reduce temperature fluctuations and stormwater management in urban areas.

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### **Trasfondo del problema**

Desde hace millones de años, el planeta Tierra ha experimentado varios ciclos naturales de calentamiento y enfriamiento (Matos, 2007). En los últimos 10,000 años, la temperatura promedio de la Tierra no ha variado más de 1.8° F (1.0° C). Durante el final de la última Era de Hielo, las temperaturas se encontraban 5 a 9° F más frías en comparación con el presente. Los territorios en la parte noreste de los Estados Unidos se encontraban cubiertos por más de 3,000 pies de nieve (IPCC, 2007).

Desde 1900, la temperatura promedio de la superficie de la Tierra ha aumentado sobre un grado Fahrenheit (Karl & Trenberth, 2003). A primera vista, un aumento de esta magnitud parece no significativo. Por otra parte, de acuerdo al Union of Concerned Scientists, “Incluso un aumento moderado de 2 a 3°F puede conllevar efectos dramáticos” (IPCC, 2007). En los últimos 50 años, la temperatura global promedio ha aumentado a la tasa más rápida registrada en la historia del mundo, de acuerdo al Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) y el Consejo Nacional de Defensa de los Recursos Naturales (NRDC, por sus siglas en inglés).

Durante el siglo 21, se ha experimentado una aceleración en el cambio climático global, a consecuencia del aumento continuo en las emanaciones atmosféricas de los gases de invernadero, tales como el bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que resultan de la combustión de materiales fósiles, provenientes de industrias y vehículos, y otros gases,

tales como el metano ( $\text{CH}_4$ ) y los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}'\text{s}$ ) que provienen de múltiples actividades antropogénicas (Karl & Trenberth, 2003). El bióxido de carbono, el principal gas de invernadero, es una sustancia natural, la cual ayuda a mantener la temperatura del planeta Tierra lo suficientemente confortable para la supervivencia de los seres humanos, las plantas y los animales. A través de la intensificación en el proceso natural conocido como el efecto de invernadero, el  $\text{CO}_2$  y otros gases, permiten la entrada de la luz solar en la atmósfera y luego, como una capa gruesa, atrapa la mayoría de la radiación infrarroja (IPCC, 2007). Debido a su extenso tiempo de residencia, aumenta la concentración de estos gases en la atmósfera, de esta forma aumentando la temperatura en la superficie del planeta (Titus, 2005).

Estos principales contribuyentes son casi transparentes a la radiación de onda corta proveniente del sol, pero no a la radiación infrarroja de onda larga emitida desde la superficie del planeta Tierra de vuelta al espacio (MacCracken, 2005). Estos gases reflejan de manera directa la radiación solar, a su vez cambiando de forma indirecta las propiedades reflectivas de las nubes y su duración.

A consecuencia del aumento en la concentración de los gases de invernadero, ha aumentado la opacidad de la tropósfera, la capa de la atmósfera que está en contacto con la superficie de la Tierra, a la radiación proveniente de la superficie. Por lo tanto, la tropósfera, absorbe y emite mayor radiación creando una masa termal sobre el planeta, de esta forma aumentando la temperatura de la superficie (Titus, 2005). La temperatura global ha aumentado alrededor de  $1^\circ\text{F}$  a lo largo del curso del siglo pasado, y continuará aumentando rápido hacia las próximas décadas (Matos, 2007).

Alrededor del 80 % de la radiación solar atrapada por la superficie de la Tierra, a consecuencia de la acumulación de gases de invernadero, es transferida a la atmósfera a través del proceso de evaporación del agua en la superficie de la Tierra y en los océanos. A tal efecto, la condensación juega un rol importante en cuanto al calor adicional acumulado en la atmósfera causando el calentamiento, mientras aumenta la precipitación (Karl & Trenberth, 2003). El 20 % restante de calor proveniente del aumento en el efecto de invernadero, contribuye de forma directa al calentamiento de la superficie y la atmósfera. Ambas contribuciones conllevan a un aumento en el vapor de agua en la atmósfera, provocando un aumento del efecto de invernadero. Por lo tanto, la energía atrapada produce una aceleración en el ciclo hidrológico, y aumenta la transferencia de vapor de agua devuelto a la superficie por medio de la lluvia y la nieve, mediante los procesos de condensación y precipitación (Karl & Trenberth, 2003).

El aumento en la disponibilidad de vapor de agua en la atmósfera, también conlleva un aumento en la energía disponible para la formación de tormentas y frentes climáticos asociados, por lo cual afecta la tasa y el volumen de precipitación, al igual que la escorrentía (Matos, 2007). Por tal razón, el aumento en el efecto de invernadero y los cambios en la temperatura global pueden llevar a cambios en el ciclo hidrológico, tales como el aumento en el proceso de evaporación, las sequías, y la intensidad en los eventos de precipitación, causa principal de las inundaciones (Karl & Trenberth, 2003).

### **Problema de estudio**

En el mundo nos enfrentamos al problema del calentamiento global, que es el aumento en la temperatura promedio de la atmósfera de la Tierra causado por el aumento en las concentraciones de los gases de invernadero. En las áreas urbanas existe un efecto

de calentamiento que resulta en la producción y acumulación de calor en las masas urbanas (Che-Ani et al., 2009). Este efecto de calentamiento urbano (“urban heat island”), es un cambio dramático en la temperatura ambiental en las ciudades en comparación con las zonas rurales y suburbanas que le rodean. A consecuencia, las áreas urbanas absorben más energía de calor, según la vegetación es reemplazada por asfalto y hormigón para carreteras, aceras, y edificios, y otras estructuras necesarias para acomodar el aumento en la densidad poblacional (Bliss, 2007; Getter & Rowe, 2006; Che-Ani et al., 2009). Además, estas superficies absorben la radiación solar, en vez de reflejarla, causando aumento en la temperatura de las superficies y la atmósfera (Karl & Trenberth, 2003).

Por otra parte, la generación de energía y contaminantes antropogénicos en la atmósfera urbana, contribuyen en la intensidad del efecto de calentamiento urbano. Los centros urbanos tienden a poseer mayor demanda de energía, en comparación con sus alrededores, a consecuencia de su alta densidad poblacional, y la demanda de aire acondicionado como resultado del aumento en el calentamiento urbano, especialmente durante los meses de verano. A su vez esto trae como resultado, un aumento en la combustión de materiales fósiles necesarios para la producción de la energía eléctrica. La contaminación creada por las emisiones procedentes de la generación de energía y de los sistemas de transportación, a su vez, aumentan la absorción de la radiación solar en la troposfera baja, y contribuyen a la formación de capas de inversión, las cuales atrapan el calor y previenen la condensación (Che-Ani et al., 2009).

Las condiciones meteorológicas asociadas a la intensificación del efecto de calor urbano, también se encuentran asociadas a los episodios de intensa contaminación en las



ciudades, altas temperaturas, y a los cambios en la cubierta de las nubes, lo cual produce una alteración del ciclo hidrológico (Che-Ani et al., 2009). A consecuencia se disminuye la frecuencia de la precipitación, y a su vez, aumenta la intensidad de la precipitación, y como consecuencia surge un incremento en el volumen de la escorrentía de agua de lluvia (Karl & Trenberth, 2003).

A consecuencia del continuo desarrollo urbano, se han eliminado las áreas verdes y espacios abiertos en las ciudades, se ha reemplazado la vegetación por extensiones de superficies impermeabilizadas, las cuales previene el flujo de la escorrentía y por consiguiente, la percolación de agua de lluvia hacia el suelo. A consecuencia de este aumento en las superficies impermeabilizadas en las ciudades, se ha inducido un desplazamiento significativo en el ciclo hidrológico (Bliss, 2007; Rosenzweig, 2006).

Durante un evento de lluvia, las plantas y el suelo absorben el agua, que de otro modo se convertiría en escorrentía. Debido a la ausencia de vegetación se produce un aumento en el flujo máximo de la escorrentía de agua de lluvia, lo cual es la causa principal de las inundaciones (Bliss, 2007). Esto se debe principalmente, a que los sistemas de alcantarillado sanitario y pluvial de agua no poseen la capacidad de manejar estas aguas durante un evento de lluvia extenso, y a consecuencia ocurre desbordamiento de escorrentía contaminada (Compton, 2007; Kloss & Calarusse, 2006). Por estas, y otras razones, se afecta de forma adversa la calidad del agua, la hidrología de los cuerpos de agua adyacentes, el hábitat, y la comunidad biótica.

### **Justificación del estudio**

Por lo general, la atmósfera en el área urbana posee una temperatura más alta en comparación con las áreas suburbanas y rurales de sus alrededores. Este problema se

debe en alto grado al efecto del calentamiento urbano, el cual se caracteriza por un aumento notable en la temperatura de las áreas urbanas, el cual ocurre como consecuencia de las modificaciones antropogénicas en la superficie y las propiedades atmosféricas que acompañan el crecimiento urbano (Karl & Trenberth, 2003).

Es importante entender los factores que producen y contribuyen a la intensidad del efecto de calentamiento urbano. Entre éstos se encuentran: la escasez de vegetación en las áreas metropolitanas, la retención de calor por contaminantes en la atmósfera urbana, y el almacenamiento de calor diurno debido a las propiedades de los materiales de construcción en las superficies de las ciudades, además de las condiciones climáticas prevalentes en el área (Bliss, 2007; Andrachuck et al., 2002). Como se mencionó anteriormente, debido a las grandes masas de superficie impermeable, se produce un aumento en el flujo de la escorrentía de agua de lluvia, ya que se previene la percolación de agua de lluvia hacia el suelo (Bliss, 2007).

Los techos con cubierta vegetal presentan la oportunidad de expandir la presencia de superficie con vegetación, reemplazando las superficies impermeabilizadas en áreas urbanas, mientras se provee una reducción en las temperaturas. De esta forma mejorando el ambiente interno de los edificios y oficinas, y a su vez, reduciendo la demanda de energía necesaria para enfriamiento. Además, los techos con cubierta vegetal actúan como fuentes viables para manejo de la escorrentía, aumentando el tiempo de detención, disminuyendo el flujo máximo y mejorando la calidad de la misma (Bliss, 2007; DeNardo et al., 2005; Emilsson 2006; Getter, & Rowe, 2006; Van Linden & Stone, 2009). Las raíces de las plantas, sus enzimas y hongos, filtran y transforman los contaminantes, del agua de lluvia que infiltra a través del suelo (Kloss & Calarusse,

2006). Transferir estos procesos hacia la superficie de los techos es una nueva opción para manejo de agua de lluvia, al convertir el espacio del techo en superficie de retención.

**Pregunta:**

¿Cómo contribuyen los sistemas de techos con cubierta vegetal en cuanto a la mitigación de los efectos del calentamiento urbano y manejo de la esorrentía de agua de lluvia en las áreas metropolitanas?

**Meta:**

Evaluar la eficiencia de los sistemas de techos con cubierta vegetal en cuanto al manejo del agua de lluvia y mitigación de las temperaturas del ambiente urbano.

**Objetivos:**

1. Establecer un sistema de techo con cubierta vegetal en una superficie existente en el área urbana.
2. Cuantificar la eficiencia del sistema de techo con cubierta vegetal en la retención del agua de lluvia.
3. Comparar el desempeño en la reducción de temperatura entre un sistema con cubierta vegetal y un techo convencional con cubierta de aislación sintética.

## **CAPÍTULO II**

### **REVISIÓN DE LITERATURA**

#### **Trasfondo histórico**

El problema del calentamiento global entró en discusión pública a partir de finales de los años setenta y principios de los ochenta. En el año 1997, coincidieron en Kyoto, Japón más de 160 naciones, con el objetivo de negociar las limitaciones en los gases de invernadero, en conformidad con los objetivos de la Convención sobre el Cambio Climático de 1992 (Stavins, 2004). El resultado de la asamblea fue establecer el Protocolo de Kyoto, en el cual las naciones desarrolladas acordaron limitar las emanaciones de gases de invernadero, con relación a las emanaciones de 1990. A su vez, los Estados Unidos de América acordaron reducir la concentración de emanaciones por un 7% durante el periodo de 2008 a 2012 (Stavins, 2004).

El objetivo primordial del Protocolo de Kioto es conseguir reducir un 5.2% las emanaciones de gases de efecto invernadero globales con respecto a los niveles de 1990 para el periodo 2008 al 2012 (Méndez Tejada, 2007). Éste es el único mecanismo internacional para comenzar a hacer frente al cambio climático y minimizar su impacto. Mediante el mismo se establecen objetivos legales obligatorios para que los países industrializados reduzcan las emanaciones de los principales gases de efecto invernadero tales como bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), además de tres gases industriales fluorados: hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (Stavins, 2004).

A través de las décadas pasadas, se ha detectado un aumento en la concentración de los gases de invernadero en la atmósfera del planeta Tierra (Akimoto, 2003). Se ha establecido la hipótesis que la continua acumulación de estos gases puede llevar a un aumento en la temperatura promedio de la superficie terrestre y a causar variación en el cambio climático global; en el nivel del mar, la producción agrícola, y en los ecosistemas (Kluger, 2007).

A partir de este movimiento surgen varios estudios en el ámbito mundial sobre la posibilidad de inundaciones costeras, eventos climáticos extremos, que nos estarían afectando dentro de los próximos veinte a cincuenta años, cuyos impactos ya se están reflejando en la actualidad (Kluger, 2007). Esta preocupación lleva a diversos países a analizar más a fondo su situación, en torno a los posibles impactos que implica el calentamiento global. Además surge un movimiento mundial para reducir o eliminar los impactos de las actividades antropogénicas que contribuyen al calentamiento global.

En el 2006, el ex vicepresidente de Estados Unidos y candidato a la presidencia en las pasadas elecciones por el Partido Demócrata, Al Gore, participó en un largometraje titulado "*An Inconvenient Truth*", en el cual realiza un análisis científico sobre las posibles causas del cambio climático y las consecuencias que tendrá para el planeta Tierra (Kluger, 2007). Este documental fue un factor crítico para crear conciencia pública en los acontecimientos relacionados al cambio climático global (Kluger, 2007). En el mismo, Al Gore establece que el calentamiento global es un grave problema para el ser humano porque es la causa principal de las tormentas cada vez más fuertes, las sequías más largas, la desaparición de los glaciares, el aumento en el nivel del mar, los cambios meteorológicos y las crecientes epidemias. Además en su documental, declara

que el calentamiento se debe en su mayoría, a la liberación de bióxido de carbono y otros gases que atrapan y retienen el calor en la atmósfera de la Tierra. Los gases actúan como una manta, atrapando la radiación solar, y como consecuencia, calentando la superficie del planeta (MacCracken, 2005). Por lo tanto, si se liberan más gases de invernadero, ocurre un incremento en el calentamiento.

Estos gases, en su mayoría, son producidos por la combustión de materiales fósiles en vehículos, centrales eléctricas, y por la pérdida de bosques y de zonas agrícolas. Los vehículos de motor y las industrias termoquímicas que funcionan con carbón son las mayores fuentes de emanación de bióxido de carbono en Estados Unidos (MacCracken, 2005). La deforestación, un problema de gran importancia a nivel mundial, también contribuye a causar una reducción en la absorción de CO<sub>2</sub>. Según los científicos, si no reducimos las emanaciones de bióxido de carbono, la temperatura media del planeta podría subir entre 3 y 9 grados a final de siglo (MacCracken, 2005).

### **Historia de los techos con cubierta vegetal**

Mientras que las técnicas de infraestructura verde, y las investigaciones sobre los sistemas de techos con cubierta vegetal se han llevado a cabo recientemente, existe evidencia de la existencia de estos desde hace miles de años. El ejemplo más antiguo lo constituye, la antigua civilización de Mesopotamia, localizada entre los ríos Tigris y Éufrates al oeste de Asia, donde hoy en día, son ocupadas por las naciones de Irak, Turquía, y Siria. Comenzando alrededor del año 4,000 A.C., en Mesopotamia se construyeron estructuras religiosas llamadas ziggurats (Bliss, 2007). Estos eran pirámides escalonadas construidas en piedras que eran rodeadas con escaleras en forma de espiral, las cuales alcanzaban varios niveles. En excavaciones arqueológicas

realizadas estos templos se ha encontrado evidencia de crecimiento de plantas en las superficies, probablemente para proteger contra los efectos del calentamiento (Bliss, 2007). Mediante estudios realizados se ha demostrado que estos han sido los primeros techos con cubierta vegetal conocidos en el mundo.

Dos de las más famosas estructuras en la historia fueron construidas con techos con cubierta vegetal. La Torre de Babel, construida en el año 600 A.C. por el Rey Nabucodonosor II en la ciudad de Babilonia (Getter & Rowe, 2006; Bliss, 2007). Además de la construcción de los Jardines Colgantes de Babilonia, considerada una de las Siete Maravillas del Antiguo Mundo.

Los techos con cubierta vegetal fueron populares a través del Mediterráneo durante la época del Imperio Romano. En la excavación de la ciudad romana de Pompeya, cubierta bajo las cenizas volcánicas durante la erupción de Monte Vesubio en el año 79 D.C., se encontró evidencia de edificios con cubierta vegetal en sus techos (Bliss, 2007).

El reinado del Papa Pius II desde 1458 hasta 1464, contribuyó al desarrollo del primer techo verde durante la época del Renacimiento en Italia (Bliss, 2007). Durante su reinado ordenó la construcción de un palacio en la ciudad de Pienza, Italia, donde se utilizó un techo verde para llevar a cabo audiencias.

En los siglos 17 y 18, los techos con cubierta vegetal fueron muy populares dentro de la nobleza de Rusia. Un ejemplo lo constituye los jardines colgantes de uno de los palacios en el Kremlin, cerca del Río de Moscow (Bliss, 2007). En la parte superior del palacio, se construyeron 10 acres con jardines que incluían un estanque y una fuente.

En 1880 se construyó el Casino Teatro, al cual se le añadió un techo verde, donde se colocó un escenario para realizar obras de teatro durante el verano (Bliss, 2007). La popularidad del casino, promovió la construcción de techos con cubierta vegetal a través de los Estados Unidos, especialmente en New York en edificios, hoteles, restaurantes, y condominios. Entre los ejemplos figuran dos de los más prestigiosos hoteles en la ciudad, el Waldorf Astoria y el Astor, los cuales poseen techos ajardinados instalados en su superficie.

En 1994, el arquitecto argentino Emilio Ambasz diseñó un nuevo edificio de oficinas gubernamentales llamado ACROS Fukuoka Prefectoral International Hall, el cual respondía a la necesidad de las áreas verdes en la zona urbana, empleando la naturaleza como componente arquitectónico (Kloss & Calarusse, 2006). De esta forma disminuyendo el impacto de los edificios en el ambiente, además de proveer eficiencia en el uso de energía.

El techo verde del Chicago City Hall es uno de los ejemplos más recientes y conocidos de estos sistemas con cubierta vegetal en los Estados Unidos. En el año 2001, este fue instalado como un experimento para determinar los efectos de los sistemas de techos con cubierta vegetal en el microclima, manejo de escorrentía, y su habilidad para sostener una variedad de plantas en un medio de crecimiento a diferentes profundidades (Kloss & Calarusse, 2006).

En el 2003, en Atlanta City, Georgia se instaló un sistema de techo con cubierta vegetal en el Atlanta City Hall. En este proyecto se deseaba determinar el desempeño de estos sistemas en cuanto a la eficiencia de energía, retención de agua de lluvia, extensión en la duración de la estructura del techo, y supervivencia de las plantas (Kloss &



Calarusse, 2006). Además de evaluar los beneficios en la disminución de temperatura durante los meses de verano.

Ese mismo año, se implantó un sistema de techo verde en un espacio de 454,000 pies cuadrados en la planta de River Rouge de la Compañía Ford localizada en Dearborn, Michigan (Kloss & Calarusse, 2006). En el 2004, este fue reconocido por Guinness World Records como el sistema de techo con cubierta vegetal más extenso del mundo. El propósito de este proyecto era revitalizar el histórico complejo del Ford Rouge Centre con un sistema de manejo de escorrentía (Kloss & Calarusse, 2006). Otros objetivos de diseño incluían el establecimiento de hábitat, reducción en la temperatura ambiental, y proveer protección a la estructura del techo.

Estos proyectos han motivado otras ciudades en el mundo a incorporar techos con cubierta vegetal en la superficie de edificios, restaurantes, hoteles, entre otros, ya que éstos presentan la oportunidad de expandir la presencia de superficie con vegetación. Estos sistemas reemplazan las superficies impermeabilizadas de las áreas urbanas, proveen una reducción en las temperaturas, y son efectivos en el manejo de la escorrentía de agua de lluvia (Bliss, 2007; Getter, & Rowe, 2006).

### **Techos con cubierta vegetal**

Los techos con cubierta vegetal, son superficies cubiertas de forma parcial o completa por vegetación, en un medio de crecimiento sobre una membrana impermeable (Taylor, 2007). Los requisitos de un techo verde incluyen: capacidad de retención de agua del medio de crecimiento y de la capa de drenaje, cierto número de especies de plantas, calidad del suelo, y el volumen de biomasa. Entre los beneficios de estos sistemas se encuentran: el manejo de la escorrentía de agua de lluvia, mejoramiento de la

calidad del agua superficial, purificación del agua de lluvia, filtración del aire, contribución a la producción de oxígeno, nivelación de las temperaturas urbanas, y contribución al establecimiento de hábitats para flora y fauna (Banting et al., 2005; Grant et al., 2005; Gedge & Kadas, 2005; Getter & Rowe, 2006).

Los techos con cubierta vegetal ayudan a moderar el flujo de la escorrentía de los eventos de precipitación porque contribuyen a detener, retener, y absorber el agua al momento que cae en su superficie (Taylor, 2007; Getter & Rowe, 2006). Además, prolongan el tiempo útil de la superficie del techo, debido a que estos sistemas protegen de los daños ocasionados por la radiación ultravioleta, las rápidas y extremas fluctuaciones de temperatura.

Existen dos tipos de sistemas de techos con cubierta vegetal: intensivos y extensivos. Ambos se distinguen a través de una serie de características que incluyen requisitos de mantenimiento, tipo de vegetación, grosor del medio de crecimiento, y requerimiento en el soporte estructural. Los sistemas de techos con cubierta vegetal extensiva están caracterizados por poseer un medio de crecimiento, compuesto de una base mineral, arena, suelo, y material orgánico (Obendorfer et al., 2007; Banting et al., 2005). La profundidad del suelo varía entre 2 a 6 pulgadas. Para estos sistemas, las plantas deben exhibir las siguientes características: rápida propagación y establecimiento, y alta densidad de cubierta de la superficie del medio de crecimiento (Getter & Rowe, 2006). Debido a la poca profundidad del medio y las condiciones extremas en la superficie de muchos techos, las plantas integradas en el sistema deben tener un crecimiento moderado y tolerancia a microclimas extremos, además deben requerir poco mantenimiento. En estos sistemas, las plantas son irrigadas y fertilizadas hasta su

completo establecimiento (Jones, 2008; Mather, 2006). Por otra parte, los sistemas de techos intensivos se componen de un medio de crecimiento con una profundidad de 6 a 24 pulgadas, y contienen, por lo tanto más sustrato. Debido a la profundidad del suelo, la selección de las plantas es más diversa y puede incluir arboles y arbustos, los cuales permiten el desarrollo de ecosistemas complejos. Estos sistemas requieren un mantenimiento continuo que incluye irrigación (Mather, 2006; Grant et al., 2005; Jones, 2008).

### **Componentes de un techo verde extensivo**

Un sistema de techo con cubierta vegetal extensiva incluyen los siguientes componentes básicos: membranas impermeables, membranas de protección, drenaje, y filtración, una barrera contra raíces, además de un medio de crecimiento y vegetación. La Figura 2.1 muestra los diferentes componentes básicos de un sistema de techo con cubierta vegetal tipo extensivo.

#### *Membrana impermeable*

La humedad es uno de los factores principales tomados en cuenta durante el diseño de un techo con cubierta vegetal (Bliss, 2007). Las plantas y el suelo del sistema absorben agua, pero aún es esencial que la estructura del techo permanezca seca y aislada de humedad. La membrana impermeable es una capa que evita el riesgo de infiltración, además de que protege la superficie del techo y prolonga su duración (VanWoert et al., 2005). Al proteger contra los efectos de la radiación ultravioleta y reducir las fluctuaciones en temperatura, los techos con cubierta vegetal extienden el tiempo útil de la membrana impermeable y mejoran la conservación de energía en un edificio (Oberdorfer et al., 2007; Getter, K.L. and Rowe, D.B., 2006). Debido a la incorporación

de vegetación en la superficie de los techos, la estabilización de las membranas impermeables puede extender el tiempo útil de éstos por un periodo mayor de 20 años.

#### *Capa protectora*

La capa protectora es una membrana geotextil instalada directamente bajo la membrana impermeable. Esta capa es de suma importancia en la protección de la superficie estructural del techo, en particular de los daños ocasionados durante la instalación del sistema (Bliss, 2007).

#### *Capa de drenaje*

La supervivencia de las plantas y la efectividad del sistema de techo verde dependen en gran medida en un drenaje apropiado. El sistema de drenaje de un techo con cubierta vegetal se compone de una capa de drenaje sobre la superficie estructural del techo, además de los canales de drenaje que transportan el exceso de agua hacia el sistema de alcantarillado pluvial (Bliss, 2007). Cuando el suelo alcanza la saturación, el exceso de agua será desviado a través de la capa de drenaje, y eventualmente transportado fuera de la superficie del techo, a través de los tubos de drenaje (Bliss, 2007).

#### *Protección contra raíces*

Bajo la membrana de drenaje se instala una capa geotextil, la cual protege la superficie estructural del techo y evita la penetración de raíces. A su vez, esta capa evita que el medio de crecimiento migre a través de la capa de drenaje. Esta capa provee una separación entre las plantas y la membrana impermeable (Bliss, 2007). La capa de

protección es extendida en el perímetro del sistema de techo con cubierta vegetal y alrededor de cualquier protuberancia para proveer un sellado completo (Bliss, 2007).

### *Medio de crecimiento*

El sustrato de un sistema de techo verde posee un alto contenido de material orgánico, debido a que el suelo debe proveer un medio de crecimiento con disponibilidad de nutrientes para las plantas. Los sustratos de techos con cubierta vegetal tienden a ser de base mineral, con pequeñas cantidades de materia orgánica, con alrededor de 10% por peso (Oberdorfer et al., 2007). Los componentes minerales pueden provenir de una variedad de fuentes, y pueden variar en peso dependiendo de la capacidad de carga de la superficie del techo. Los suelos utilizados en la construcción de los sistemas de techos con cubierta vegetal son más livianos, y por lo general consisten de 75% mineral y 25% de material orgánico en comparación con los suelos mixtos típicos (Oberdorfer et al., 2007). Estos deben ser formulados de manera rigurosa con respecto a los niveles apropiados de oxígeno, nutrientes, humedad y pH.

El sustrato de los techos con cubierta vegetal posee la habilidad de retener material particulado y contaminantes en el agua de lluvia y reducir la cantidad de escorrentía, que fluyen fuera de éstos. Estos sistemas contribuyen a mejorar la calidad de la escorrentía de agua de lluvia, al igual que la calidad del agua que reciben los cuerpos superficiales (Sherman, 2005). Las propiedades físicas y químicas del medio de crecimiento, al igual que la cubierta vegetativa ayudan a controlar el nitrógeno, fósforo, y otros contaminantes generados de las actividades industriales (Banting et al., 2005). Estas sustancias pueden ser absorbidas, transformadas y utilizadas por las plantas. La mayoría del tiempo, los metales pesados y los nutrientes que se encuentran en el agua de

lluvia son atrapados por el medio de crecimiento de los sistemas de techos con cubierta vegetal en vez de ser descargados en la escorrentía (Banting et al., 2005).

En general, el suelo de un sistema de techo verde debe ser capaz de absorber, retener, y disminuir la liberación de nutrientes para mantener las plantas con vida bajo condiciones extremas (Watchtel, 2007). El medio debe tener la capacidad de retención y dosificación de la escorrentía de agua de lluvia. Absorben el agua rápido durante una tormenta, y luego la liberan de forma gradual, controlando la intensidad de la escorrentía durante una tormenta (Villareal, 2007; Getter & Rowe, 2006). Pero al mismo tiempo, el medio de crecimiento debe retener bastante humedad para mantener el sistema de raíces de las plantas saludables y para reducir o eliminar la necesidad de irrigación (Watchtel, 2007).

### *Vegetación*

La vegetación es el componente más importante en los sistemas de techos con cubierta vegetal. Las plantas proveen una amplia variedad de beneficios, entre éstos, reducen la contaminación atmosférica, ya que recolectan el material particulado, en sus hojas (Gedge & Kadas, 2005). Por medio del proceso de fotosíntesis, las plantas utilizan energía de la radiación solar para convertir el bióxido de carbono en oxígeno y clorofila (Oberdorfer et al., 2007). Por otra parte, las hojas por medio del proceso de evapotranspiración liberan humedad, absorben calor, y proveen sombra. Las raíces de las plantas, sus enzimas y hongos micorrizales, filtran y tratan el agua de lluvia que se infiltra a través del suelo. Al reproducir estos procesos en la superficie de los techos, se puede proveer un manejo de agua de lluvia más apropiado, eficiencia de energía en el interior de los edificios, mejora la ecología urbana, y el valor estético (Grent et al., 2005).

Las plantas utilizadas en la superficie de los techos deben resistir la velocidad del viento, la escasez de agua, y las fluctuaciones extremas en temperatura. Las plantas apropiadas para los techos con cubierta vegetal extensivos comparten adaptaciones que les permiten sobrevivir en condiciones extremas (Oberdorfer et al., 2007). Entre las características requeridas se encuentran: la tolerancia a la tensión ambiental, el crecimiento moderado, rápida propagación y establecimiento, follaje perenne o grueso, y resistencia a la escasez de agua. Las plantas CAM (Crassulacean Acid Metabolism) son aptas para este tipo de sistemas debido a su capacidad de almacenaje de agua o fisiología particular. Estas plantas poseen estomas que abren y cierran durante diferentes periodos del día para maximizar la retención de agua y minimizar su pérdida (Mather, 2006).

La composición y características de la vegetación en los techos con cubierta vegetal dependen de varios factores, además de las condiciones locales. La profundidad del sustrato determina la diversidad de la vegetación y la variedad de posibles especies (Oberdorfer et al., 2007). Los sustratos poco profundos entre 0.8 a 2 pulgadas poseen altas tasas de desecación y están más sujetos a fluctuaciones en temperatura. Por otra parte los sustratos con profundidades entre 2.8 a 5.9 pulgadas pueden mantener diversas mezclas de grama, geófitos, y plantas herbáceas tolerantes a la escasez de agua, pero también son propensos al crecimiento de las hierbas indeseables (Oberdorfer et al., 2007).

### **Efecto de invernadero y el calentamiento global**

Las temperaturas en el planeta Tierra dependen en mayor grado de la cantidad de luz solar recibida, la cantidad de luz reflejada hacia el espacio, y la magnitud en la retención de calor en la atmósfera (Titus, 2005). El planeta Tierra se encuentra rodeado de una capa delgada de gases, los cuales se mantienen por gravedad, y consisten de 78%

de nitrógeno, 21% de oxígeno, y otros (Karl & Trenberth, 2003). Estos principales constituyentes son casi transparentes a la radiación de onda corta proveniente del sol, pero no a la radiación de onda larga emitida desde la superficie de la Tierra hacia el espacio (MacCracken, 2005).

Tanto el vapor de agua como el bióxido de carbono presentes en la atmósfera, absorben parte de esta radiación infrarroja, produciendo un efecto de calentamiento en la atmósfera. Luego esta energía es devuelta hacia la superficie del planeta Tierra (MacCracken, 2005). Este balance energético de energía se conoce como el efecto de invernadero, debido a que la atmósfera, asemeja paneles de cristal, permitiendo la entrada de la luz solar, pero a su vez, retiene el calor (Titus, 2005). La radiación que desciende de la atmósfera, es el doble de la energía recibida directamente del sol sobre la superficie de la Tierra. Sin el efecto natural de invernadero, la superficie del planeta sería 33° C (60° F) más fría que la temperatura actual (Titus, 2005).

Los gases de invernadero que ocurren de forma natural, irradian energía mucho más rápido, en comparación con otros gases que existen en la atmósfera. Por lo tanto, las altas concentraciones de estos gases aumentan el efecto de calentamiento en el planeta Tierra, ya que aumentan la habilidad para absorber la radiación infrarroja. Este efecto se produce en su mayoría en la parte baja de la atmósfera, en la estratosfera, donde ocurre una mayor absorción de radiación, debido a la acumulación de gases de invernadero (MacCracken, 2005).

Los cambios en la composición atmosférica debido al aumento en las emanaciones de los gases de invernadero, tales como el bióxido de carbono, el metano, y el óxido nítrico, provienen de las actividades antropogénicas (Karl & Trenberth, 2003).



Estos gases atrapan la radiación que sale del planeta Tierra hacia el espacio, produciendo un efecto intenso de calor en el planeta. Debido al extenso tiempo de residencia de estos gases, el resultado es una acumulación y aumento en su concentración en la atmósfera (Karl & Trenberth, 2003).

La disminución en la calidad del aire es un problema continuo en el ámbito de las ciudades. En éstas existen un gran interés en medir y manejar la concentración de contaminantes atmosféricos, desde que estos se han intensificado debido a las actividades antropogénicas, como la quema de combustible fósil, la presencia de calentamiento urbano y la ausencia de controles naturales (Banting et al., 2005; Gaffin et al., 2009).

Existe evidencia que sugiere que los techos con cubierta vegetal proveen una oportunidad para reducir la concentración de contaminantes atmosféricos locales disminuyendo las temperaturas extremas en el verano, atrapando material particulado y gases de invernadero (Banting et al., 2005). Estos sistemas de techos con cubierta vegetal poseen un efecto indirecto en cuanto a la reducción de las emanaciones de CO<sub>2</sub>. La vegetación contribuye a la calidad del aire, atrapando las partículas y disolviendo o secuestrando contaminantes gaseosos, en particular bióxido de carbono, a través de las estomas que se encuentran en sus hojas. Como se había señalado, las propiedades físicas y químicas del medio de crecimiento, al igual que la cubierta vegetativa ayudan a controlar el nitrógeno, fósforo, y otros contaminantes como el bióxido de carbono generados de las actividades industriales como la quema de materiales fósiles, los cuales escapan de la superficie de los techos (Banting et al., 2005).

El agua de la superficie de la Tierra, actúa de manera efectiva como amortiguador de temperatura, según la energía proveniente de la radiación solar es utilizada en el

proceso de evaporación. Debido a que las áreas metropolitanas se encuentran cubiertas en alto grado por superficies impermeables de hormigón y asfalto, tales como edificios, aceras, carreteras, y estacionamientos, éstas experimentan mayor efecto de calentamiento (Ahmad & Hashim, 2007; Banting et al., 2005; Frazer, 2005; Shufro, 2005;). Ocurre una mayor resequedad de la superficie y mayor concentración de vapor de agua, un gas de invernadero dominante. La acelerada resequedad aumenta la incidencia y severidad de las sequías, mientras que el aumento en concentración del vapor de agua en la atmósfera incrementa el riesgo de eventos de precipitación intensos por cortos periodos de tiempo (Karl & Trenberth, 2003).

### **El ciclo de hidrológico**

A pesar que la cantidad de agua en el planeta Tierra y en la atmósfera es constante, la distribución de esta cambia de forma frecuente. La mayoría del agua se encuentra contenida en los océanos, con grandes concentraciones en otros cuerpos de agua tales como, ríos, arroyos, y lagos. El continuo movimiento y almacenamiento de agua sobre y debajo de la superficie de la Tierra, es decir el movimiento de agua de una fase y localización, se conoce como el ciclo hidrológico (Martin, 2008).

La energía solar conduce este ciclo por medio del proceso de evaporación del agua de la superficie de la Tierra, almacenándola como vapor de agua que se condensa y regresa al suelo como precipitación (Martin, 2008). Parte de esta agua se evapora a la atmósfera, donde permanece hasta que se convierte en precipitación y regresa nuevamente a la superficie del planeta, mientras otra se infiltra en el suelo (Kloss & Clarusse, 2006). Mientras otra parte, se infiltra, abastece los acuíferos subterráneos y le supe flujo a los cuerpos de agua superficiales (Martin, 2008). La precipitación que cae

sobre el suelo puede seguir una de las tres rutas principales: esta puede retornar a la atmósfera por medio del proceso de evapotranspiración, se puede infiltrar en el terreno o puede fluir a través de la superficie como escorrentía. El suelo puede absorber un volumen significativo de agua, pero el efecto disminuye de forma rápida cuando alcanza la saturación (Liptan & Murase, 2002; Getter & Rowe, 2006). La efectividad de este proceso depende en gran parte de la porosidad del suelo, su profundidad y el área superficial cubierta por la vegetación. Además, parte del agua infiltrada se puede convertir en flujo superficial. El agua que es descargada hacia los cuerpos de agua se convierte en escorrentía superficial. Durante todos los procesos de este ciclo ocurre evaporación. De esta forma, el ciclo hidrológico se mantiene circulando constantemente el agua en el planeta Tierra (Liptan & Murase, 2002). La presencia del agua en la atmósfera ayuda a mantener estable la temperatura del aire en la superficie de la tierra.

### **Efecto de calentamiento urbano**

Es típico que el aire de las zonas urbanas sea más caliente que en las áreas en sus alrededores (US EPA, 2007). Este calentamiento ocurre como consecuencia de las modificaciones antropogénicas en la superficie y las propiedades atmosféricas que acompañan el crecimiento urbano (Banting et al., 2005). Además, se está reemplazando la vegetación y los espacios abiertos, por superficies impermeabilizadas, como aceras, edificios y techos de concreto, y las áreas asfaltadas como estacionamientos y carreteras, las cuales absorben y almacenan la radiación solar durante el día, y emiten calor en la noche (Ahmad & Hashim, 2007; Banting et al., 2005; Bliss, 2007; Frazer, 2007; Getter & Rowe, 2006; ).

La designación de “isla de calor” es dada a este fenómeno, debido a los patrones isotérmicos de la temperatura de la superficie, el cual asemeja los contornos de un área aislada de las condiciones frías de los alrededores (Banting et al., 2005). La mayor diferencia en la temperatura urbana y la temperatura de los alrededores define la intensidad del efecto de calor aislado. Los alrededores fríos coinciden con las áreas abiertas, donde se encuentran la vegetación y los cuerpos de agua superficiales.

El efecto de calentamiento urbano está relacionado a las altas densidades urbanas y la configuración de edificios en las áreas metropolitanas (Compton, 2007). Debido a la conglomeración de estructuras y edificios, se reducen la pérdida de calor por radiación de onda larga en la noche (Ahmad & Hashim, 2007; Oberdorfer et al., 2007). Otros factores que contribuyen la intensidad del efecto de calentamiento urbano incluyen: la retención de calor por contaminantes en la atmósfera, almacenamiento de calor diurno debido a las propiedades de los materiales en las superficies construidas, las emanaciones de calor a consecuencia de la remoción de vegetación y las superficies impermeabilizadas en las ciudades que previenen la percolación de agua de lluvia en el suelo (Ahmad & Hashim, 2007; Banting et al., 2005; Martin, 2008; Shufro, 2005).

En la presencia de humedad almacenada, la energía es utilizada para evaporar el agua al igual que en las áreas abiertas y rurales. Este uso de calor para evaporación crea un efecto de enfriamiento, y por lo tanto reduce la temperatura de los alrededores (Banting et al., 2005; Emilsson & Rolf, 2005; Getter & Rowe, 2006). En las ciudades, la ausencia de tal humedad almacenada, debido al aumento de las superficies impermeables, resulta en una elevación de la temperatura de la superficie y en el aire debido a la transferencia de calor (Sonne, 2006). La ausencia de vegetación y la naturaleza de las

superficies impermeabilizadas pueden ser mitigadas por los sistemas de tratamiento de techos con cubierta vegetal (Ahmad & Hashim, 2007; Bliss, 2007; Shufro, 2005).

Los beneficios de plantar árboles en las zonas metropolitanas para enfriar el aire han sido significativos. Estos contribuyen en la reducción de la concentración de gases de invernadero, tales como bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ ), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), y ozono ( $\text{O}_3$ ). El ozono ocurre en áreas urbanas, donde prevalecen las superficies impermeables como el asfalto y el concreto, la ausencia de vegetación, y la combustión de material fósil (Mather, 2006).

El rápido aumento en la densidad poblacional, particularmente en las áreas desarrolladas, la continua industrialización, y la migración hasta los centros urbanos han ocasionado que las zonas metropolitanas se conviertan en fuentes importantes de contaminación atmosférica en comparación con las fuentes dispersas y estacionarias (Ahmad & Hashim, 2007; Akimoto, 2003; Rosenzweig et al., 2006). Estos son factores que contribuyen a la formación del ozono en la tropósfera, a su vez aumentando las temperaturas locales. Este fenómeno puede afectar el crecimiento de la vegetación en las áreas urbanas interfiriendo con la habilidad de las plantas para crecer y almacenar alimento (Mather, 2006).

Otro problema de las áreas urbanas es la gran demanda por espacio, lo cual inhibe la expansión de las áreas forestadas (Banting et al., 2005). Los techos con cubierta vegetal presentan la oportunidad de expandir la presencia de superficie con vegetación, reemplazando las superficies impermeabilizadas en áreas urbanas, proveyendo una reducción en las temperaturas, en particular durante el verano (Oberdorfer et al., 2007).

La tecnología de techos con cubierta vegetal ofrece la posibilidad de mitigar los efectos del calentamiento urbano en comparación con los techos convencionales.

### **Impacto del desarrollo urbano**

El desarrollo urbano impone cambios significativos en el ciclo hidrológico alterando el flujo natural del agua. Las construcciones en el área urbana están marcadas por el reemplazo de la vegetación por superficies impermeabilizadas, las cuales reducen la proporción de agua que regresa hacia la atmósfera y se infiltra en el terreno, causando un aumento en el volumen de agua que permanece en la superficie (Banting et al., 2005; Getter & Rowe, 2006; Martin, 2008).

La urbanización está caracterizada por la presencia de superficies extensivas impermeabilizadas, tales como carreteras, estacionamientos, aceras, techos y suelos compactados. Estas superficies alteraran el ciclo hidrológico natural, previniendo que el agua fluya de forma natural, se infiltre en el terreno, y se lleven a cabo los procesos de evaporación y condensación, de esta forma reduciendo el almacenamiento y recarga de los acuíferos subterráneos y cuerpos de agua superficial (Getter & Rowe, 2006). A consecuencia de que no ocurre percolación al terreno, el agua tiende a convertirse en escorrentía que fluye a través de las superficies impermeabilizadas recogiendo y transportando materiales como sedimento, químicos tales como plaguicidas, hidrocarburos de petróleo, patógenos, nutrientes, entre otros, que a su vez, pueden afectar los ecosistemas acuáticos en los cuales descarga (Carter & Rasmussen, 2006; Getter & Rowe, 2006).

Además, a consecuencia de la amplia extensión de superficies impermeables y con bajo porcentaje de albedo, las zonas urbanas absorben más energía de calor, ya que

estas superficies absorben la radiación solar, en vez de reflejarla, causando aumento en la temperatura de las superficies y la atmósfera (Karl & Trenberth, 2003).

La centralización de terrenos para uso comercial en una sola área es la causa para la conglomeración de edificios, industrias, vehículos, y el aumento en la demanda energética contribuyen de gran manera en la intensidad del efecto de calentamiento urbano (Rosenzweig et al., 2006). Este calor adicional ocurre a consecuencia de las actividades antropogénicas, las cuales aumentan de forma directa las temperaturas en la superficie, mientras que la conglomeración de los gases de invernadero en la atmósfera, aumentan la absorción de la radiación, contribuyendo a la creación de la capa de inversión. Esta capa previene que el aire se enfría a una tasa normal, además de afectar la dispersión lenta de contaminantes producidos por actividades antropogénicas en las zonas urbanas (Rosenzweig et al., 2006).

### **Escorrentía de agua de lluvia**

La escorrentía de agua de lluvia ha sido identificada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) como una de las principales fuentes de contaminación que afectan la calidad del agua (Molloy & Albert, 2007). En reglamentos desarrollados recientemente bajo el Sistema Nacional de Eliminación de Descarga de Contaminantes (NPDES, por sus siglas en inglés) de la EPA, se enfatiza el uso de prácticas para el buen manejo (BMP's) con el propósito de mejorar la calidad de la escorrentía de agua de lluvia (Sherman, 2005). Este sistema de permiso prohíbe descargas de contaminantes en las aguas superficiales sin autorización; de esta forma se reglamenta las fuentes precisas que descargan contaminantes en las aguas de los Estados Unidos (Molloy & Albert, 2007).

La Agencia de Protección Ambiental promueve el uso de la infraestructura de techos con cubierta vegetal para capturar la escorrentía de agua de lluvia que de otra forma puede fluir hacia las carreteras, aceras, estacionamientos, donde se contamina, y luego descarga en un cuerpo de aguas superficial adyacente, afectando la calidad del mismo. Además de que estos sistemas contribuyen a minimizar el flujo excesivo de los alcantarillados sanitarios y pluviales (Watchtel, 2007; Molloy & Albert, 2007). Los techos con cubierta vegetal son una avanzada opción para manejo de agua de lluvia, al convertirse en superficies de retención. A través de la infraestructura de techos con cubierta vegetal, el agua de escorrentía y sus contaminantes pueden ser manejados utilizando sistemas naturales que colectan, almacenan, y transportan agua. Estos sistemas mitigan la escorrentía durante eventos de lluvia, reduciendo el volumen y la tasa de escorrentía (Mather, 2006; Getter & Rowe, 2006)

Las zonas urbanas son consideradas como áreas que generan gran volumen de escorrentía, debido al gran porcentaje de áreas impermeabilizadas, las cuales impiden la percolación del agua en el terreno (VanWoert et al., 2005). Como consecuencia, ocurre una sobrecarga en las instalaciones de tratamiento agua de lluvia, ya que se excede la capacidad del sistema, causando desbordamiento de aguas mixtas (Comptom, 2007; Kloss & Calarusse, 2006). Debido a esta situación, el efluente contaminado es desviado del sistema de tratamiento de aguas usadas, y es liberado directamente hacia las aguas superficiales, violando la Ley de Agua Limpia (Hoffman, 2006). El desbordamiento de aguas usadas en las áreas urbanas contiene bacterias, patógenos, nutrientes, desechos industriales sin tratar, contaminantes tóxicos, incluyendo aceites y pesticidas, sólidos de las aguas usadas y debris (Frazer, 2005; Getter & Rowe, 2006). Como consecuencia se



afecta la calidad del agua de escorrentía, a su vez contaminando los cuerpos de agua superficiales y subterráneos.

Los sistemas de techos con cubierta vegetal son ideales para el manejo del agua del agua de lluvia en las zonas urbanas debido a que utiliza espacio existente de la superficie del techo, y previene que la escorrentía fluya fuera del área (Watchel, 2007). Además, estos sistemas almacenan el agua de lluvia durante eventos de precipitación, decelerando la escorrentía por un periodo de tiempo, luego de la ocurrencia del evento de lluvia (Gretten & Rowe, 2006). Otro beneficio de estos sistemas es que devuelven la precipitación hacia la atmósfera por medio del proceso de evapotranspiración (Compton, 2006).

La contaminación de la escorrentía de agua de lluvia ocurre antes que el agua de lluvia alcance el suelo. Según la lluvia cae a través de la atmósfera, ésta recoge los contaminantes suspendidos en el aire provenientes de la combustión vehicular, y de las emanaciones industriales (Bliss, 2007). Estos materiales pueden llegar al suelo y pueden transferirse según el agua fluye. El ciclo hidrológico determina hacia donde fluye la escorrentía una vez precipite hacia el suelo (Bliss, 2007). Parte de la precipitación se convierte en escorrentía, parte se infiltra hacia la superficie terrestre y se convierte en agua subterránea, mientras otra parte es absorbida en el proceso de evapotranspiración.

En las áreas urbanas existe una gran extensión de superficies impermeables, las cuales no permiten la absorción de agua y cambia su balance. Estas superficies son creadas por carreteras, la superficie de los techos, y las aceras, entre otras estructuras (Banting et al., 2005; Bliss, 2007; Shufro, 2005). El volumen de la escorrentía superficial aumenta, como consecuencia de la disminución en la infiltración.

Las prácticas de buen manejo de agua de escorrentía (BMP's) proveen herramientas útiles para disminuir el volumen y mejorar la calidad de escorrentía de agua de lluvia (Banting et al., 2005). Los techos con cubierta vegetal ofrecen oportunidad de actuar como fuentes viables para manejo de agua de escorrentía. Estos sistemas son capaces de filtrar los contaminantes del agua de lluvia (Banting et al., 2005; Kloss & Claruse, 2006; Shufro, 2005). Además, pueden degradar contaminantes, ya sea por absorción de las plantas o por filtración del agua que percola dentro del medio de crecimiento, por la acción de las raíces de las plantas y los hongos micorrizales (Banting et al., 2005).

Dentro de un sistema de techo verde la profundidad del sustrato, la pendiente de la superficie, el tipo de comunidad de plantas y los patrones de precipitación afectan la tasa de escorrentía (Getter & Rowe, 2006; Obendorfer et al., 2006; Retzlaff, 2007; VanWoert et al., 2005). El aumento en la profundidad del medio de crecimiento también impacta la capacidad de retención de agua de los techos con cubierta vegetal, demorando que descarga durante un evento de lluvia (Carter & Rasmussen, 2006; Hoffman, 2006). Por tal razón, los sistemas de techos con cubierta vegetal son esenciales para el manejo de la escorrentía, ya que absorben el agua rápido durante una tormenta, y libera de forma gradual, lo cual puede controlar la intensidad de la escorrentía durante una tormenta (Getter & Rowe, 2006; Villareal, 2007). Al mismo tiempo, el medio de crecimiento debe retener bastante humedad para mantener el sistema de raíces de las plantas saludables y para reducir o eliminar la necesidad de irrigación (Watchel, 2007). Los techos verdes retienen el agua de lluvia hasta que el medio de crecimiento llega a su punto de saturación máximo (Gretter & Rowe, 2006). No obstante la escorrentía es retenida en ese

periodo en que el medio de crecimiento llega a la saturación, y en lo que el agua drena fuera del mismo. Las tasas de retención de agua de lluvia pueden variar dependiendo de los patrones de precipitación, la profundidad del medio, y la temporada (Gretter & Rowe, 2006; Obendorfer et al., 2007). El volumen es reducido y el flujo es disminuido en comparación con un techo convencional, mitigando la carga de las instalaciones e infraestructura de manejo de agua de lluvia y de aguas usadas (Compton, 2006; Getter & Rowe, 2006).

## **Estudio de casos**

### **Compost utilization goes through the roof**

En un estudio realizado en las instalaciones del Centro para la Investigación de los Techos con Cubierta Vegetal de la Universidad de Pennsylvania, que consistía de seis modelos estructurales de edificios, tres sistemas de techos con cubierta vegetal extensivos, y los restantes, techos convencionales donde se evaluaría los efectos de mitigación de los techos con cubierta vegetal (Mather, 2006). Cada sistema de techos con cubierta vegetal está compuesto de una membrana impermeable y una barrera que controla la penetración de las raíces, además de una capa de drenaje, medio de crecimiento con una profundidad de tres pulgadas, y vegetación.

Cada edificio poseía su propio sistema de recolección de agua de lluvia instalado con canales y recipientes de recolección de agua. Además poseían una estación de climatología para recolectar datos de precipitación, radiación solar, temperatura, además de la velocidad y dirección del viento (Mather, 2006). Entre los hallazgos de esta investigación se encontró que los sistemas de techos con cubierta vegetal retuvieron un promedio de 0.26 pulgadas o aproximadamente 45 % del total de la precipitación durante

el periodo de estudio, en comparación con los techos de referencia. Por otra parte, la tasa de escorrentía tenía un promedio de 0.09 pulgadas por hora o 56 % de la intensidad de la precipitación. Además la escorrentía de estos sistemas fue demorada en flujo en un promedio de 5.7 horas (Mather, 2006). Estos resultados comprueban que los sistemas de techos con cubierta vegetal colaboran en el manejo del agua de lluvia.

### **Energy efficiency and environmental benefits of rooftop gardens**

En el Consejo Nacional de Investigación (NCR, por sus siglas en inglés) de Ottawa, Canadá, se diseñó una investigación para estudiar el desempeño termal y los beneficios ambientales de los sistemas de techos con cubierta vegetal de acuerdo a las condiciones climáticas. Un área experimental de alrededor de 700 ft<sup>2</sup> se dividió en dos partes iguales mediante una pared divisoria (Liu, 2002). En un área se instaló un sistema de techos verde, mientras que el otro extremo permaneció como un techo convencional para ser utilizado como referencia. El sistema de techo verde extensivo incorporaba una membrana para evitar la penetración de las raíces, una capa de drenaje y filtración, además de un medio de crecimiento para las plantas. Mediante el análisis de los datos recolectados se comparó el desempeño termal y la retención de agua de lluvia para ambos sistemas.

Según los resultados obtenidos, se determinó que a una temperatura ambiental de 95° F durante la tarde, la membrana en el techo convencional absorbió radiación solar, y alcanzó una temperatura aproximada de 158° F. Por otra parte, la membrana del sistema de techo verde, permaneció a una temperatura aproximada de 77° F (Liu, 2002). Estos resultados se deben a que los sistemas de techos con cubierta vegetal moderan las fluctuaciones en la temperatura ambiental, debido a que las plantas y el medio de

crecimiento mantienen la superficie del techo fresca durante el verano. Estos sistemas proveen sombra, aislamiento, y enfriamiento mediante el proceso de evaporación, tanto en las plantas como en el sustrato.

Además, se determinó que en eventos de lluvia ocurridos en un periodo de 12 horas, los sistemas de techos con cubierta vegetal detuvieron el flujo de la escorrentía por 45 minutos, y absorbieron alrededor de 0.1 pulgada de lluvia antes que fluyera fuera de la superficie del techo (Liu, 2002). Además se redujo la tasa de escorrentía por un 75 % durante el primer evento, y se retuvo un 45 % de lluvia con un medio de crecimiento relativamente húmedo (Liu, 2002). Por medio de estos resultados, se demuestra que los sistemas de techos con cubierta vegetal son efectivos en la detención del flujo por un periodo de tiempo, además de reducir la tasa y el volumen de escorrentía.

#### **Green roof stormwater retention: Effects of surface, slope, and media depth**

En dos estudios realizados en el Michigan State University Horticulture Teaching and Research Center, se utilizaron varias plataformas para cuantificar los efectos de varios sistemas de tratamiento para la retención de agua de lluvia. En el primer estudio se utilizaron tres sistemas de tratamiento de techo para cuantificar las diferencias en retención de agua de lluvia entre un techo convencional, un techo verde extensivo sin vegetación, y uno extensivo típico con vegetación (VanWoert et al., 2005). Durante el estudio se determinó el porcentaje promedio en la retención de agua de lluvia de 48.7% en el techo convencional, mientras que en el sistema de techo verde con vegetación el promedio de retención fue de 82.8% (VanWoert et al., 2005).

En el segundo estudio se analizó la influencia de la pendiente del suelo entre 2 a 6.5%, y una profundidad del medio de crecimiento de 2.5, 4.0, y 6.0 centímetros en la

retención de agua de lluvia (VanWoert et al., 2005). Para todos los eventos de lluvia combinados, la plataforma con una pendiente con un 2% y una profundidad de 4 centímetros, obtuvo la mayor retención con un 87%. Esto comprueba que la combinación de una pendiente reducida y un medio de crecimiento profundo, reduce la cantidad total de la escorrentía de agua de lluvia. Para ambos estudios, los sistemas de techos con cubierta vegetal, además de reducir la cantidad de escorrentía de agua de lluvia, demoraron el tiempo de flujo de la misma.

## **Marco legal**

### **Constitución del Estado Libre Asociado de Puerto Rico**

La constitución de Puerto Rico es el estatuto matriz del derecho ambiental insular y señala en su Artículo VI sección 19 que "el Estado Libre Asociado tendrá como política pública, la más eficaz conservación de sus recursos naturales, así como el mayor desarrollo y aprovechamiento de los mismos para el beneficio de la comunidad". Desde el establecimiento de nuestra constitución, se ha perseguido la conservación de nuestros recursos naturales y se incluyó como un deber que tenemos todos los puertorriqueños.

### **Ley de Política Pública Ambiental**

La Ley Número 416 de 22 de septiembre de 2004, Ley sobre Política Pública Ambiental, faculta a la Junta de Calidad Ambiental a adoptar, promulgar, enmendar y derogar reglamentación para la protección del ambiente en Puerto Rico. "Esta ley legislativa constituye el primer y principal esquema estatuario adoptado en Puerto Rico

para atender de modo integral los asuntos planteados en el país en relación con la administración del medio ambiente”.

Entre los propósitos de esta ley se encuentran: el establecimiento de una política pública que estimule una armonía agradable y conveniente entre el ser humano y su ambiente; la fomentación de los esfuerzos que evitarán o mitigarán los impactos al ambiente y la biosfera, además de estimular la salud y el bienestar de las personas. A su vez, pretende enriquecer la comprensión de los sistemas ecológicos y fuentes naturales importantes para Puerto Rico y establecer una Junta de Calidad Ambiental”.

Mediante esta ley, se incorporan las reglas de conducta social o ética ambiental, y por consiguiente, se declaran los principios de la política ambiental. Promueve cumplir con la responsabilidad de cada generación como custodio del ambiente para beneficio de las generaciones subsiguientes, además de asegurar para todos los puertorriqueños paisajes seguros, saludables, productivos y estéticos. Además, promueve mejorar la calidad de los recursos renovables y velar por el uso juicioso de aquellos recursos que sufran agotamiento.

La Ley de Política Pública Ambiental reconoce el impacto que tiene el ser humano en el ambiente y establece los elementos necesarios para que éste y la naturaleza de la que forma parte, puedan existir en armonía. Esta ley, reconoce la importancia del ambiente y que toda persona tiene la responsabilidad de contribuir a su conservación y mejoramiento. Además, pretende conservar los aspectos naturales y mantener la diversidad de los recursos naturales. Las disposiciones de esta ley se aplican al área de estudio cuando reconoce la importancia de que se lleven a cabo medidas que fomenten la protección del ambiente en general.

**Ley de Agua Limpia** (Clean Water Act, CWA) 33 U.S.C.A § 1251-1387

La Ley de Agua Limpia (CWA, por sus siglas en inglés), establece la estructura básica para reglamentar las descargas de contaminantes en las aguas de los Estados Unidos, y establecer las normas de calidad para las aguas superficiales (US EPA, 2002). El propósito de esta ley es restaurar y mantener la integridad química, física, y biológica de las aguas. Además, se prohíbe la liberación de agua con elevadas concentraciones de sustancias tóxicas, contaminantes, y asegurando que las aguas superficiales posean las normas necesarias para el disfrute de los seres humanos, para deportes y recreación acuática (US EPA, 2002).

La ley ordena que se desarrolle un plan comprensivo entre las agencias federales y estatales. Requiere que se mejore la calidad del agua, debido a la necesidad que existe de mantenerlas en condiciones favorables para proteger la vida acuática y silvestre, para poder utilizarla como agua potable, para uso agrícola e industrial, y otros propósitos.

Existen varios programas bajo la ley dirigidos a fuentes indirectas o dispersas, fuentes directas, aguas de escorrentía, plantas de tratamiento, dragado y relleno de estas áreas donde existe agua, control de aceite y de sustancias peligrosas (US EPA, 2002).

**Sistema Nacional de Eliminación de Descarga de Contaminantes (NPDES)**

Por medio de esta ley se introduce un sistema de permisos, manejado por la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés), conocido como el Programa Nacional de Eliminación de Descarga de Contaminantes (NPDES, por sus siglas en inglés). Este sistema de permisos prohíbe descargas directas de contaminantes en las aguas superficiales sin autorización, de esta forma reglamentando las fuentes precisas (US EPA, 2002).



Este programa reglamenta, mediante permisos, las descargas de agua de lluvia provenientes de las industrias y los municipios. Va dirigido a controlar las fuentes precisas que descargan de forma directa a las aguas navegables. Por medio de este programa se restringe la cantidad de contaminantes que pueden ser descargados a base de unas guías de efluentes (US EPA, 2002). Además se requiere que se cumpla con las normas de calidad de agua establecidas por el estado.

### **Programa de Control de Fuentes Dispersas**

La ley requiere que se establezcan programas para controlar la contaminación de fuentes dispersas (US EPA, 2002). Las fuentes dispersas son las aguas usadas que no fluyen a través de tuberías o lugares específicos. También se les denomina como aguas de escorrentía, que se recogen por los alcantarillados de aguas pluviales. Estas aguas se contaminan según van fluyendo a través de las diversas superficies, recogiendo a su paso, aceites, sustancias tóxicas, plaguicidas, entre otros contaminantes, y en la mayoría de las ocasiones terminan descargando en los cuerpos de agua superficiales (Frazer, 2005; Getter & Rowe, 2006).

### **Ley Sobre Control de Contaminación de las Aguas**

La Junta de Calidad Ambiental (JCA) es la agencia que se encarga de implantar la ley y administrar varios programas bajo la Ley sobre Política Pública Ambiental. “Será ilegal que persona alguna, arroje, descargue, derrame o vierta de forma directa o indirecta, materia orgánica o inorgánica capaces de contaminar los cuerpos de agua superficiales.” Sin embargo, la mayor responsabilidad del control sobre la contaminación de las aguas cae bajo la jurisdicción de la Agencia de Protección Ambiental, por medio de la Ley de Agua Limpia. Por tal razón, se requiere obtener un permiso para descargar

sustancias en cualquier cuerpo de agua, para evitar la contaminación de este recurso natural.

### **Reglamento de Estándares para la Calidad de Agua de Puerto Rico**

El Reglamento de Estándares para la Calidad de Agua de Puerto Rico establece los usos para los cuales la calidad de los cuerpos de agua de Puerto Rico deberá ser mantenida y protegida. En este reglamento se prescriben normas de la calidad de agua a fin de conservar y proteger los distintos cuerpos de agua. Además, se identifican reglas y reglamentos aplicables a las fuentes de contaminación que puedan afectar la calidad de las aguas, y se prescriben medidas adicionales necesarias para alcanzar y mantener la calidad de éstas (JCA, 2003).

Conforme a los propósitos de este Reglamento se promulgan las siguientes normas de calidad de agua para la protección de los usos designados bajo las clasificaciones de las aguas costaneras, superficiales, estuarios, humedales y agua subterránea de Puerto Rico (JCA, 2003). Todos los cuerpos de agua superficial deberán cumplir con ciertas normas de calidad en cuanto a color, olor, sabor o turbiedad, temperatura, materiales radioactivos y tóxicos, sólidos suspendidos, coloides o sedimentales, demanda bioquímica de oxígeno, asbesto, y composición de aceites y grasas. La Junta de Calidad Ambiental reconoce que la contaminación de las aguas, afecta la salud y el bienestar público. Además, es perjudicial a la vida silvestre, los peces y otra vida acuática. La contaminación impide el uso del agua para motivos domésticos, agrícolas, industriales, recreativos y otros usos beneficiosos (JCA, 2003).

**Ley de Aire Limpio** (Clean Air Act, CAA) 42 U.S.C.A § 7401 et seq

La Ley de Aire Limpio (CAA, por sus siglas en inglés), establece la protección y el mejoramiento de la calidad del aire, así como la protección de la salud pública, el bienestar, y la capacidad productiva de la población (US EPA, 2004). Además promueve la iniciación y desarrollo de programas que logren la prevención y control de la contaminación atmosférica.

Esta ley posee dos objetivos principales: mejorar la calidad del aire y reducir o eliminar ciertos contaminantes que han sido asociados con problemas de salud humana, y el ambiente. Existen seis contaminantes para los cuales la Agencia de Protección Ambiental ha establecido estas normas (US EPA, 2004). Estos contaminantes incluyen el ozono (O<sub>3</sub>), el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y de azufre (SO<sub>x</sub>), los hidrocarburos y el material particulado (PM). La Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) es responsable de establecer y mantener las normas de la calidad de aire, limitando las cantidades de contaminantes peligrosos provenientes de las emanaciones industriales (US EPA, 2004). Esta agencia trabaja con los gobiernos estatales y locales para determinar y esforzar los niveles seguros de calidad de aire.

**Normas Nacionales para la Calidad del Aire**

La Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) está obligada a adoptar normas para mantener los estándares en la calidad del aire en el ambiente, denominadas Normas Nacionales para la Calidad del Aire. Estas normas se adoptan para cada contaminante del cual se hayan publicado documentos que contengan las últimas evaluaciones científicas en relación a los efectos sobre la salud pública y el ambiente.

Además, especifican la concentración de los contaminantes atmosféricos permitidos en el exterior de una estructura.

**Ley Sobre el Control de la Contaminación del Aire (24 LPRA §1271-1276)**

Esta ley establecida por la Junta de Calidad Ambiental reglamenta mediante permisos la prevención, disminución y control de la contaminación atmosférica. Se define como contaminación del aire “la presencia de uno o más contaminantes en cierta concentración y por un periodo de tiempo en la atmósfera, que sea perjudicial para la salud humana y el medio ambiente” (US EPA, 1995). Entre los contaminantes del aire se encuentran: el polvo, humo, vapor, gases, sustancias olorosas, material particulado, y cualquier combinación de éstos.

## CAPÍTULO III

### METODOLOGÍA

En este estudio determinamos la eficiencia de la aplicación de los sistemas de techos con cubierta vegetal, en cuanto al manejo de la escorrentía de agua de lluvia, y la reducción de los efectos de calentamiento urbano. Para evaluar su eficiencia, diseñamos e instalamos un sistema de techo con cubierta vegetal en una superficie existente del área urbana. Además, cuantificamos las diferencias del tiempo de detención de la escorrentía de agua de lluvia entre un techo con cubierta vegetal, y uno con cubierta de aislación sintética (referencia). Para determinar la eficiencia de estos sistemas en cuanto a la mitigación de los efectos de calentamiento urbano, comparamos las temperaturas superficiales de un techo convencional y uno con cubierta vegetal. Además, realizamos observaciones de los eventos de precipitación y la variación en temperatura por un periodo de estudio de un año desde mayo de 2008 hasta abril de 2009.

#### **Área de estudio**

El área donde enfocamos el presente estudio fue la superficie del techo de una estructura ubicada en el área de San Juan, Puerto Rico ( $18^{\circ} 22' 42.69''$  N/  $66^{\circ} 5' 38.66''$  W) (Figura 3.1). El municipio de San Juan se localiza al noreste central de Puerto Rico bordeado al norte por el Océano Atlántico. Durante el periodo de estudio, el clima del municipio comprendió mayormente de días calurosos. El clima de Puerto Rico posee características similares a otras islas tropicales debido al predominio de los vientos alisios del este. Sin embargo, durante las noches, la mayoría de los vientos se desplazan hacia el

noroeste por influencia de la brisa de tierra a mar. Este cambio en la dirección del viento produce un clima que no es muy variable, con temperaturas promedios que varían entre 10 a 12 grados durante el transcurso del año.

Por otra parte, la precipitación es abundante a través de todo el año en la mayor parte de la isla. La temporada anual de lluvia ocurre en mayo y de agosto a diciembre. Los meses con menor evento de lluvia son febrero y marzo. Los eventos de lluvia consisten en su mayoría de aguaceros aislados que ocurren durante la tarde o noche, por lo general de no más de una pulgada por evento, pero en ocasiones de 4.5 pulgadas o más.

En el centro de la ciudad de San Juan, al igual que las grandes ciudades, se produce mayor concentración de calor en comparación con las zonas rurales y suburbanas que le rodean, debido al efecto de calentamiento urbano. Este efecto se produce a consecuencia del reemplazo de la vegetación por superficies impermeabilizadas, y de mucha absorción de radiación solar, tales como carreteras, edificios, aceras, entre otros, que absorben un alto porcentaje de la radiación solar (Rosenzweig et al., 2006).

### **Objetivo 1: Diseñar y establecer un sistema de techo con cubierta vegetal en una superficie del área urbana**

Construimos un sistema de techo con cubierta vegetal en la superficie de una oficina para analizar su eficiencia. El techo experimental posee un área superficial de alrededor de 1,000 pies cuadrados. La superficie del techo fue seleccionada por su accesibilidad y su fortaleza para acomodar peso adicional, entre otras cualidades. Debido a que la estructura era existente, incorporamos un sistema de techo verde extensivo, el cual no requiere soporte estructural adicional debido a su grosor fino y peso liviano. Consideramos la localización del sol con respecto a la estructura, durante el diseño e

instalación del sistema con cubierta vegetal. Para este experimento dividimos la superficie del techo en dos áreas iguales: un techo con cubierta vegetal tipo extensivo y un techo de hormigón con capa sintética de aislamiento, el cual permaneció como referencia.

Para la instalación del sistema de techo con cubierta vegetal (Apéndice 1), se añadió como base, una membrana impermeable, la cual evita los riesgos de infiltración y prolonga el tiempo de duración de la superficie del techo, ya que lo protege de las fluctuaciones de temperatura causadas por los rayos ultravioleta. La próxima membrana incorporada se compone de una capa geotextil protectora, la cual protege la membrana del techo, en particular de los daños durante la instalación del sistema. Además instalamos *Atlantic Drainage Cells* o celdas de drenaje como una cubierta uniforme continua sobre la superficie que dirige hacia las entradas del drenaje. Esta capa de drenaje permite que el agua fluya en el sistema del techo verde hacia el sistema de drenaje del edificio. El grosor típico de esta capa es menor de 20 milímetros (0.8 pulgadas). Sobre la capa de drenaje, se coloca una capa geotextil, la cual protege y evita la penetración de las raíces. Otra función de esta capa es evitar la migración del suelo hacia la capa de drenaje. Sobre la capa geotextil añadimos el medio de crecimiento con alto contenido orgánico con disponibilidad de nutrientes para las plantas. Este suelo es de peso liviano y consiste de 60% mineral y 40% de material orgánico. La profundidad del medio varió entre 3 a 12 pulgadas de grosor.

En caso de un tiempo prolongado de sequía, colocamos un sistema de riego por goteo e irrigación, el cual dosifica de forma homogénea el sistema de techo con cubierta vegetal con un determinado número de galones (Apéndice 1). Este sistema se encuentra

conectado a un tanque de retención con capacidad de 1,000 galones. Para poder reutilizar el agua almacenada instalamos, una bomba de medio caballo de fuerza para retornar el agua por medio de un tubo de *poli vinyl chloride* (PVC) de 3/4 de pulgada de diámetro hacia el sistema vegetativo. Para controlar el flujo de agua que retorna al techo, los sistemas de riego por goteo e irrigación se conectan a válvulas volumétricas y contador de agua para controlar volumen, de esta forma se logra que se asperje el sistema de manera homogénea y controlada.

Como último componente, añadimos la vegetación en el medio de crecimiento del sistema de techo verde. Entre las plantas establecidas en este sistema se encontraban: *Asparagus desinflorus*, *Cortaderia selloana*, *Hemigrafis alternata*, *Lychnis chalcedonica*, *Nephrolepis exaltata*, *Tulbaghia violácea*, y *Zoysia manila*. Las plantas se seleccionaron de acuerdo al poco crecimiento de sus raíces, y su habilidad de resistir las extremas fluctuaciones en temperatura, tolerancia a la ausencia de agua, y la baja concentración de nutrientes encontradas en la superficie del techo. Además, debido a su rápida propagación y establecimiento, poco requisito de mantenimiento, y alta densidad de cubierta del medio de crecimiento.

## **Objetivo 2: Evaluar la eficiencia del sistema de techo con cubierta vegetal en el manejo de la esorrentía de agua de lluvia**

Para evaluar la eficiencia del sistema de techo con cubierta vegetal en cuanto al manejo del agua de lluvia, en comparación al techo de referencia, diseñamos un sistema para recolección de la esorrentía. El techo con cubierta vegetal y el techo con cubierta de aislación sintética fueron equipados con termómetros, una estación de meteorología, y tanques de retención para almacenamiento de agua de lluvia. Para medir un aproximado de la caída de lluvia durante los eventos de precipitación, utilizamos un pluviómetro.



Durante el periodo de estudio, que comprendía desde mayo 2008 hasta abril de 2009, se registraron 113 eventos de lluvia.

Para almacenar el agua de lluvia, conectamos cada tanque de retención a las salidas de drenaje de la estructura, mediante dos tubos PVC de 2 a 4 pulgadas de diámetro, los cuales recogen la escorrentía para ambos sistemas. Además, se instaló un sistema de medición para determinar el nivel del tanque de retención y el volumen de agua almacenado.

### **Diseño metodológico:**

Durante el periodo de estudio procedimos a recopilar los datos de precipitación y el volumen de agua almacenado para cada tanque, por evento de lluvia ocurrido en el año. Para determinar el volumen de cada tanque y el volumen de precipitación, se utilizaba un contador de agua. Determinamos la caída de lluvia durante los eventos de precipitación mediante un pluviómetro, mientras que la escorrentía la cuantificamos por medio de la comparación del volumen almacenado en ambos tanques de retención. Cuando el medio de crecimiento excedía su máxima capacidad de retención, el exceso de precipitación se convertía en escorrentía. Por lo tanto, el volumen de retención para el sistema con cubierta vegetal es la diferencia entre el volumen de agua para ambos tanques y la precipitación para cada evento de lluvia. Para evitar desbordamiento, el tanque conectado al techo de referencia era vaciado para cada evento. Todos los datos recopilados durante el periodo de estudio los registramos en tablas. Al cuantificar las diferencias en la retención de agua de lluvia para ambos techos, se puede establecer la eficiencia de los sistemas con cubierta vegetal como alternativa para al manejo de la escorrentía.

**Análisis de datos:**

Los datos registrados durante el periodo de estudios fueron analizados utilizando el método estadístico de regresión lineal simple para determinar si existe dependencia entre el volumen de escorrentía capturada, el volumen de precipitación y duración del evento. Para determinar la eficiencia del sistema con cubierta vegetal en cuanto al manejo de agua de lluvia, se procedió a realizar una comparación entre el volumen de precipitación y el volumen de agua almacenado en cada tanque. La determinación de que factores predicen mejor la capacidad de retención de los techos con cubierta vegetal puede contribuir a predecir los efectos hidrológicos de un evento de lluvia extremo en un área de techo, con mayor precisión.

**Objetivo 3: Determinar la eficiencia de los sistemas de techos con cubierta vegetal para mitigar los efectos del calentamiento urbano**

Para poder determinar la eficiencia de los sistemas de techo con cubierta vegetal en la reducción de los efectos de calor, procedimos a comparar las temperaturas superficiales de un techo con cubierta vegetal, y uno convencional de hormigón con cubierta de aislación sintética compuesta de bitumen y aluminio. Para registrar las temperaturas instalamos termómetros digitales en la superficie del techo con cubierta vegetal y techo convencional con tratamiento de aislación sintética. La temperatura ambiental se determinó mediante un termómetro colocado a una altura de 5 pies sobre el nivel del techo. Las temperaturas superficiales de cada techo desde el interior de la oficina, fueron registradas mediante la instalación de termómetros debajo de la superficie interna de cada uno. Un termómetro digital manual con sensor fue utilizado para tomar medidas en la superficie del medio de crecimiento.

**Diseño metodológico:**

Durante un periodo de 12 meses, que comprendía de mayo de 2008 a abril de 2009, fueron tomadas medidas de temperatura cinco días a la semana durante la mañana, a mediodía, y en la tarde. Las medidas incluyen la temperatura de la superficie del techo convencional con cubierta de aislación sintética, la superficie del medio de crecimiento, la temperatura ambiental, y la temperatura interior bajo la superficie de cada uno de los techos. Además, se tomaron cuatro medidas en la superficie del medio de crecimiento a diferentes profundidades que variaban entre 3 a 12 pulgadas, utilizando un termómetro digital manual con sensor. Para este estudio las medidas de temperatura fueron tomadas en grados Fahrenheit (°F). Todos los datos fueron registrados y analizados por medio de tablas y graficas. Al analizar las diferencias en temperatura tanto para ambos techos, se puede determinar la eficiencia del sistema con cubierta vegetal como una opción para mitigar las fluctuaciones en temperatura presentes en las áreas urbanas.

**Análisis de datos:**

Sintetizamos la información de lluvia, escorrentía, temperatura de la superficie del techo, el medio de crecimiento, y el interior de la estructura en tablas. Se establecieron graficas para establecer patrones de relación entre las variables seleccionadas. Entre las posibles variables a considerar se encuentran: la lluvia, la sombra, la temperatura, y el tiempo climático. Para este estudio comparamos las temperaturas interiores y exteriores tanto para la superficie del techo con cubierta vegetal como para el techo de referencia. Analizamos los factores por medio de tablas y graficas, donde se expresa la diferencia en temperatura para cada sistema.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para determinar la eficiencia y efectividad, en cuanto al manejo de la escorrentía y la mitigación de los efectos de calentamiento urbano, instalamos un sistema de techo con cubierta vegetal en una superficie en una oficina existente en el área de San Juan (Apéndice 1). Con el propósito de cumplir los objetivos estipulados, durante este estudio se registramos y analizamos eventos de precipitación y las fluctuaciones en temperatura por un periodo de un año.

#### **Establecimiento del techo con cubierta vegetal**

El sistema con cubierta vegetal extensiva fue construido en el mes de febrero de 2008 en una estructura del techo de una oficina en el área urbana de San Juan, Puerto Rico. Durante los primeros dos meses, irrigamos y aplicamos fertilizante al sistema. Durante el periodo de estudio, el sistema de techo con cubierta vegetal se estableció completamente cubriendo de forma homogénea la superficie del medio de crecimiento. Todas las plantas del sistema resistieron las condiciones drásticas en la superficie de un techo tales como: la frecuente exposición solar, las fluctuaciones en temperatura, la velocidad del viento, y la ausencia de agua.

Debido a que este sistema es de tipo extensivo no se requiere de mucho mantenimiento, excepto aplicación de fertilizante y poda del césped de ser necesario. Además se aplicaba irrigación en caso de no ocurrir un evento de lluvia en un periodo prolongado.

### **Eventos de lluvia**

Para este estudio equipamos el techo con cubierta vegetal y el techo con cubierta de aislación sintética con instrumentos diseñados para medir temperatura, precipitación, y almacenamiento de agua de lluvia. Registramos un total de 113 eventos de lluvia, durante el periodo de estudio, que comprendía desde mayo 2008 hasta abril de 2009 (Tabla 1). Para el periodo de estudio documentamos durante 113 de 187 días, las medidas de precipitación. Estos eventos resultaron en 78.94 pulgadas (1895.30 mm) registradas con la estación de meteorología ubicada en el área de estudio. De los 113 eventos de lluvia un total de 18 resultaron mayores de 0.010 pulgadas (0.05 mm) de la precipitación. Registramos 72 eventos mayores de 0.10 pulgadas (2.54 mm) y 23 eventos con más de 1 pulgada (25.4 mm) de precipitación. El evento de lluvia mayor fue registrado el 24 de julio de 2008, donde se registro un total de 5.5 pulgadas (139 mm). La Tabla 1 muestra la precipitación observada mensualmente durante el periodo de estudio. Observamos una variación en precipitación de 0.010 pulgadas (0.254) mm hasta aproximadamente 5.5 pulgadas (139.7 mm).

### **Retención de escorrentía**

Tanto el sistema con cubierta vegetal como el sistema con cubierta de aislación sintética mostraron resultados distintos para cada evento de lluvia durante el periodo de estudio. El techo verde retuvo la precipitación hasta alcanzar su máxima capacidad; luego la escorrentía fue liberada de forma controlada.

Durante el periodo de estudio, el tratamiento con cubierta vegetal retuvo 56.6 %, es decir 796.4 mm del total de precipitación anual (1895.3 mm), mientras que el techo de referencia resultó en 3.33 %, es decir 63.1 mm, el cual se atribuye a pérdida por

evaporación. La retención total de precipitación (56.6%) puede atribuirse a la distribución en la caída de lluvia en la zona, el grosor del medio de crecimiento, y la membrana de drenaje instalada en el sistema del techo.

Durante los eventos de lluvia, la capacidad de almacenaje, es decir el volumen de agua retenido en el techo con cubierta vegetal se extiende de 0.25 mm a 29.50 mm, y de 0.02 mm a 2.54 mm para el techo de referencia. El techo con cubierta vegetal retuvo un promedio de 7.27 mm (65.6%), mientras que el sistema con cubierta de aislación sintética retuvo un promedio de 0.56 mm (2.6%). La comparación de estos resultados demuestra la eficiencia por parte de los sistemas con cubierta vegetal de 6.71 mm (63%) en cuanto a la capacidad de almacenaje promedio y de la retención de agua de lluvia.

La retención de agua de lluvia varía con el volumen de precipitación, la temporada, y la frecuencia de los eventos de lluvia (Figuras 5 y 6). De acuerdo a la Figura 7, un aumento en el volumen de la precipitación está relacionado con un aumento en la capacidad de almacenaje del sistema de techo con cubierta vegetal, en comparación con el techo de referencia. Como era de esperarse, el sistema de techo con cubierta vegetal retuvo y redujo de manera exitosa la generación de la escorrentía para eventos de lluvia menores de 5.5 pulgadas (139.70 mm) ocurridos en el área de estudio. Este sistema retuvo sobre 796.4 (42%) del total de la precipitación (1,895.30 mm) que ocurrió durante el periodo de estudio de mayo de 2008 a abril de 2009. Varios estudios han reportado una tasa de retención mayor o igual a 50% (DeNardo et al., 2005; Carter & Butler, 2008; Carter & Rasmussen, 2006; VanWoert et al., 2005; EPA, 2009). Al comparar las altas tasa de retención reportadas en los resultados de estos estudios, con los resultados obtenidos durante este estudio pueden deberse a varios factores tales como: el

grosor del medio de crecimiento, la composición del sustrato, la distribución de la precipitación, y las fluctuaciones en temperatura. Para este experimento, el techo de referencia produjo aproximadamente la misma retención en precipitación que los techos convencionales de los estudios de DeNardo et al. (2005) Vander Linden & Stone (2009).

Los resultados de retención y detención sugieren que las pérdidas por evaporación del medio de crecimiento contribuyen a una mayor reducción de humedad en el suelo durante eventos de lluvia, en comparación con el proceso de transpiración llevado a cabo por la vegetación. Estos resultados apoyan aquellos de VanWoert et al. (2005) y Carter y Rasmussen (2006). La mayoría de las plantas seleccionadas para componer un sistema de techo con cubierta vegetal poseen la característica de minimizar la pérdida de agua.

### **Fluctuaciones en temperatura**

Las plantas y el medio de crecimiento en el sistema de techo verde mantienen la membrana superficial a una temperatura estable durante los meses más calurosos, por medio de la sombra, la aislación y el proceso de evapotranspiración. Durante las mañanas observamos bajas temperaturas en el techo convencional debido a que este se encontraba directamente expuesto a la atmósfera durante la noche, mientras que el sistema de techo verde se encontraba cubierto por un medio de crecimiento y vegetación.

Para comparar los resultados en cuanto a la eficiencia térmica, procedimos a dividir el periodo de estudio por estaciones del año; primavera, verano, otoño, e invierno. Los datos tomados del sistema de cubierta vegetal y cubierta de aislación sintética (techo de referencia) fueron analizados y comparados para determinar el desempeño termal.

Para la primavera se escogió mayo, como mes representativo. Al analizar los datos de temperatura durante las mañanas del mes de mayo (Tabla 2), observamos una

diferencia en la temperatura ambiental entre 84°F y 72.3°F. En las Figura 8 y 9 se presenta la diferencia en temperatura interior en la parte inferior del sistema con cubierta vegetal, la cual se fluctuó entre 82.5°F y 79.5°F, mientras que la temperatura exterior se encontraba entre 81.8°F y 79.5°F. Al comparar la temperatura del techo con cubierta con aislación sintética, la temperatura interior se encontraba en 85.3°F y 81.5°F, mientras que la exterior variaba entre 94.4°F y 75.4°F. Documentamos una gran fluctuación en las temperaturas exteriores para ambas cubiertas de alrededor de 10 °F para temperaturas máximas.

Al analizar la Tabla 3 para los datos registrados durante el mediodía, registramos una diferencia en la temperatura ambiental entre 93.9°F y 72.1°F. Al analizar la Figura 10 documentamos una variación entre 83°F y 78.5°F para la temperatura interior bajo el sistema con cubierta vegetal, en comparación con la temperatura interior tomada en la parte inferior del techo con cubierta con aislación sintética, la cual fluctuaba entre 86.5°F y 81.5°F. Para ambos sistemas, identificamos una diferencia en temperatura de 3.5 °F. Debido a las altas temperaturas registradas, registramos una diferencia en temperaturas exteriores máximas de 31°F (Figura 11). Durante este mes, detectamos una temperatura exterior del techo con cubierta vegetativa que variaba entre 88.7°F y 80.5°F, mientras que la temperatura exterior del sistema del techo con cubierta sintético fluctuaba entre 119.8°F y 78.2°F.

Según la Tabla 4, donde se muestran los datos de temperatura registrados durante la tarde para el mes de mayo, se observó una variación en la temperatura ambiental entre 88.6°F y 73.6°F. En la Figura 12 se muestra una variación en la temperatura interior bajo el sistema con cubierta verde entre 84°F y 79.5°F, la temperatura interior en la parte



inferior del sistema con cubierta con aislación sintética, la misma se encontraba entre 92°F y 85°F. Documentamos una diferencia de alrededor de 7°F, al comparar las temperaturas en el interior para ambos sistemas (Figura 13). La temperatura exterior para el sistema con cubierta vegetal fluctuaba entre 89.5°F y 80.7°F, mientras que para el sistema con aislación sintética variaba entre 97.4 F y 78.5°F.

Seleccionamos el mes de agosto para presentar la temporada de verano. Durante las mañanas observamos temperaturas ambientales máximas y mínimas entre 86.4°F y 72.9°F (Tabla 5). Al analizar la Figura 14 observamos una temperatura interior 79.5°F en el inferior del techo con cubierta vegetal, mientras que la temperatura en la parte inferior del techo con cubierta de aislación sintética variaba en 84°F. Para ambos sistemas, registramos una diferencia en la temperatura exterior en el área con cubierta vegetal entre 86.4°F y 82°F, en comparación con la temperatura en la cubierta de aislación sintética, la cual fluctuaba entre 85.8°F y 75.3°F (Figura 15). Detectamos una diferencia en temperatura de ambas cubiertas de alrededor de 5°F. Como se mencionó, durante las mañanas la temperatura exterior del sistema con cubierta vegetal es menor ya que permaneció expuesta a la atmósfera durante la noche.

Al comparar los datos de la Tabla 6 de las temperaturas al mediodía, registramos una diferencia en temperatura ambiental de 92.7°F y 83.1°F. La Figura 16 ilustra la diferencia en temperaturas máximas y mínimas en el exterior del área de la cubierta vegetal entre 90.5°F y 87.6°F, en comparación con la temperatura en la cubierta de aislación sintética la cual variaba entre 122.6°F y 94.7 °F. Identificamos una variación de alrededor de 32°F para temperaturas exteriores máximas y de 7°F en temperaturas mínimas para ambos sistemas. Al analizar la Figura 17 observamos una diferencia en

temperatura entre 85°F y 83.1°F en la temperatura interior en el inferior del techo con cubierta vegetal, mientras detectamos que la temperatura interior en la parte inferior del techo con cubierta de aislación sintética se encontraba en 86.5°F.

Durante las tardes de verano, registramos variaciones en la temperatura ambiental entre 87.1°F y 74.8°F, de acuerdo a los datos de la Tabla 7. Al comparar las temperaturas en el exterior tanto en la cubierta verde como en la cubierta de aislación sintética observamos una diferencia de 5°F en temperaturas máximas. La Figura 18 ilustra las temperaturas exteriores de la cubierta vegetativa y la cubierta con aislación sintética. Documentamos una diferencia en temperatura entre 90.8°F y 87.4°F para el sistema vegetativo, mientras que para el sistema de aislación sintética fluctuaba entre 95.5°F y 79°F. Durante las tardes de verano registramos una variación en la temperatura interior en la parte inferior de ambas cubiertas. De acuerdo a la Figura 19, la temperatura interior bajo el techo con cubierta vegetal variaba entre 84°F y 80.5°F, mientras que la temperatura bajo el sistema con cubierta de aislación sintética fluctuaba entre 89.5°F y 86°F. Para este sistema observamos una diferencia de alrededor de 6°F.

Para presentar la temporada de otoño escogimos a noviembre como mes representativo. Durante las mañanas identificamos las temperaturas ambientales máximas y mínimas entre 81.7°F y 72.7°F (Tabla 8). Al analizar la Figura 20 documentamos una diferencia en temperatura interior entre 77.5°F y 77°F en el inferior del techo con cubierta vegetal; por otra parte, identificamos una diferencia entre 80.5°F a 77.5°F en la temperatura interior en la parte bajo el techo con cubierta con aislación sintética. Además, registramos una diferencia en temperatura de ambas cubiertas de alrededor de 4°F. Para ambos sistemas, detectamos una diferencia en las temperaturas

exteriores en el área con cubierta vegetal entre 79.3°F y 78.9°F, en comparación con la temperatura en la cubierta con aislación sintética, la cual fluctuaba entre 78.0°F y 74.2°F (Figura 21).

Al comparar los datos de la Tabla 9 de las temperatura al mediodía, observamos que a una diferencia en temperatura ambiental de 85.3°F y 75°F. Al analizar la Figura 22 detectamos una diferencia en temperatura 79.5°F y 77.5°F en la temperatura interior bajo el techo con cubierta vegetal; por otra parte, documentamos una diferencia de 82°F a 78.5°F en la temperatura interior bajo el techo con cubierta de aislación sintética. La Figura 13 ilustra una diferencia en temperaturas máximas y mínimas en el exterior del área de la cubierta vegetal entre 85.3°F y 79.5°F, en comparación con la temperatura en la cubierta de aislación sintética, la cual variaba entre 115.6°F y 84.4 °F.

Durante las tardes de otoño, registramos variación en la temperatura ambiental de 83.1°F y 79.3°F, de acuerdo a los datos de la Tabla 10. Al comparar las temperaturas en el exterior tanto en la cubierta verde como en la cubierta de aislación sintética observamos una diferencia de 7°F en temperaturas máximas. La Figura 24 ilustra las temperaturas exteriores de la cubierta vegetativa y la cubierta con aislación sintética. Detectamos una diferencia en temperatura entre 85.8°F y 84.6°F para el sistema vegetativo, mientras que para el sistema con aislación sintética fluctuaba entre 92.3°F y 82°F. De acuerdo a la Figura 25, la temperatura interior en el inferior del techo con cubierta vegetal se encontraba en 78.5°F, mientras que la temperatura en el inferior del sistema con cubierta de aislación sintética variaba entre 83°F y 79.3°F. Para este sistema, documentamos una diferencia de alrededor de 4°F.

Seleccionamos el mes de marzo para presentar la temporada de invierno. Durante las mañanas observamos temperaturas ambientales máximas y mínimas entre 78.6°F y 67.9°F (Tabla 11). Para ambos sistemas, detectamos una diferencia en la temperatura exterior en el área con cubierta vegetal entre 73.8°F y 75.5°F, en comparación con la temperatura en la cubierta de aislación sintética, la cual fluctuaba entre 72.3°F y 70.5°F (Figura 26). La temperatura ambiental influye bastante en la temperatura en el techo con cubierta con aislación sintética, ya que este se encuentra en mayor exposición a las condiciones climáticas en comparación con el sistema de techo con cubierta vegetal. En la Figura 27 identificamos una diferencia en temperatura interior entre 74°F y 72.5°F en el inferior del techo con cubierta vegetal y una diferencia entre 77.6°F a 77.5°F en la parte inferior del techo con cubierta con aislación sintética. Al comparar la temperatura de ambas cubiertas determinamos una diferencia de alrededor de 4°F.

Al comparar los datos de la Tabla 12 para las temperaturas al mediodía, observamos una diferencia en temperatura ambiental entre 89.4°F y 75.1°F. Al analizar la Figura 28 encontramos una diferencia en temperatura 81.5°F y 78.5°F en la temperatura interior en el inferior del techo con cubierta vegetal y una diferencia entre 83°F y 79.5°F en la temperatura interior en la parte inferior del techo con cubierta con aislación sintética. La Figura 29 ilustra una diferencia en temperaturas exteriores máximas y mínimas en el área de la cubierta vegetal. Las mismas variaban entre 84°F y 81.4°F, mientras que la temperatura en la cubierta de aislación sintética fluctuaba entre 115.7°F y 77.8°F.

Durante las tardes de invierno, determinamos variaciones en la temperatura ambiental entre 87.2°F y 68.6°F, de acuerdo a los datos de la Tabla 13. Al comparar las temperaturas en el exterior tanto en la cubierta vegetal como en la cubierta de aislación

sinéctica observamos una diferencia de 10°F en temperaturas máximas. La Figura 30 ilustra las temperaturas exteriores de la cubierta vegetativa y la cubierta con aislación sinéctica. Encontramos una diferencia en temperatura entre 83.4°F y 72.5°F para el sistema vegetativo y para el sistema de aislación sinéctica entre 93.7°F y 78.8°F. Durante las tardes de invierno no determinamos variación en la temperatura en el interior en la parte inferior del sistema de techo con cubierta vegetativa. De acuerdo a la Figura 31, la temperatura interior bajo el sistema con cubierta vegetal fluctuaba en 75.5°F, mientras que la temperatura bajo el sistema con cubierta de aislación sinéctica variaba entre 85°F y 80.5°F. Para este sistema identificamos una diferencia de alrededor de 10°F en temperaturas máximas.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Dos de los problemas que enfrentan las áreas urbanas con alta densidad poblacionales son el manejo de la escorrentía de agua de lluvia y el efecto de calentamiento urbano. A tal motivo se deben proveer tecnologías más eficaces y efectivas para el manejo de la calidad y volumen de la escorrentía, al igual que de la intensificación en las temperaturas, y la reducción en el uso adicional de energía eléctrica necesaria para enfriamiento. El objetivo de este estudio determinamos la eficiencia en la aplicación de un sistema con cubierta vegetal en una estructura existente para mitigar estos problemas ambientales presentes en las ciudades.

En este estudio analizamos el desempeño de un sistema de techo con cubierta vegetal en cuanto a la retención y detención de la escorrentía. Los resultados mostraron que el sistema con cubierta vegetal retuvo un promedio de 65.6%, en comparación con el techo de referencia, el cual reflejó una pérdida por evaporación de un promedio de 2.56% de agua en los eventos de lluvia ocurridos durante el transcurso del estudio. Debido al medio de crecimiento, el agua es retenida hasta que el suelo llegue a su máxima capacidad de saturación. Luego la escorrentía es liberada de forma gradual. Este retraso contribuye a prevenir la ocurrencia de un desbordamiento en los sistemas de alcantarillado pluvial y sanitario, permitiendo que se procese la escorrentía por un periodo de tiempo a una tasa de flujo más baja.

Por medio de este estudio, registramos las fluctuaciones en temperatura para una superficie con cubierta vegetal y otra con cubierta de aislación sintética en la estructura de

un techo en el área urbana en San Juan, Puerto Rico. Realizamos un análisis de los resultados en fluctuaciones en temperatura para ambos sistemas. Los resultados mostraron que el sistema con cubierta vegetal reduce de forma más eficaz la temperatura en el interior de una estructura. Los sistemas de techo verde pueden moderar el flujo de calor, a través de la superficie del techo por medio de la sombra, aislamiento, el proceso de evapotranspiración, y efecto de masa termal. Estos componentes pueden reducir la radiación solar absorbida en comparación con el techo de referencia. A su vez, contribuyendo con la reducción en la demanda de energía eléctrica necesaria para aire acondicionado, en especial durante los meses de primavera y verano.

El medio de crecimiento y la vegetación en un sistema de techo verde previene los daños causados por la alta exposición a la radiación ultravioleta que experimenta la membrana del techo, y minimiza la degradación, lo cual extiende la durabilidad y su tiempo útil de vida. Esto se debe a las propiedades de este sistema en cuanto a que refleja la energía solar de vuelta al espacio, lo cual significa que absorben menos energía solar, de esta forma manteniendo la superficie a una temperatura estable.

Para este estudio, utilizamos un techo con extensión superficial de 1,000 pies cuadrados dividido en dos áreas iguales: un techo con cubierta vegetal y el resto del techo permaneció como referencia. Para un próximo estudio utilizaremos la superficie del techo de tres estructuras con las mismas dimensiones donde se incorporara una cubierta vegetal, una cubierta de aislamiento sintética y un techo de hormigón como referencia. En una de las estructuras se colocará un sistema con cubierta vegetal, mientras el otro techo permanecerá como control. De esta forma podemos realizar una comparación de las

temperaturas interiores y exteriores, al igual que el volumen de retención para ambas estructuras de forma más eficiente, y obtener resultados más precisos.

Durante el periodo de estudio sólo consideramos los datos de temperatura y precipitación. Para determinar con más precisión la efectividad de los sistemas de techo con cubierta vegetal, es necesario tomar a diario datos en temperatura y precipitación, al igual que considerar los factores, tales como humedad relativa, velocidad del viento, y la evapotranspiración. También es necesario comparar los datos de temperatura ambiental en el área del proyecto con los registros en una estación de meteorología cercana al proyecto.

Recomiendo analizar la calidad de la esorrentía almacenada para determinar las siguientes características: conductividad, pH, nitrógeno, fosforo, turbidez, total de sólidos suspendidos y/o disueltos en el agua, de acuerdo a los estudios de Vander Linden & Stone (2009), y EPA (2009). Además, se debe determinar el tiempo de retención del agua de lluvia en el medio de crecimiento desde el inicio del evento de lluvia hasta la generación de la esorrentía al ocurrir la saturación del medio. Para así detener más datos registrados que evidencien la función de los sistemas de techo con cubierta vegetal en el manejo de agua de lluvia. Un futuro estudio podría concentrarse en el incremento de la tasa de transpiración en los sistemas de techo con cubierta vegetal utilizando otro tipo de vegetación.

En Puerto Rico, las áreas urbanas, industriales, y centros comerciales comprenden de un 75-95% de las superficies impermeables. Los techos con cubierta vegetal presentan la oportunidad de expandir la presencia de superficie con vegetación, reemplazando las superficies impermeabilizadas en áreas urbanas. Además, los techos con cubierta vegetal



actúan como fuentes viables para manejo de la escorrentía, aumentando el tiempo de detención, disminuyendo el flujo máximo y mejorando la calidad de la misma.

Si se aplicara cubierta vegetal en la superficie de los techos en estas áreas se contribuirá de gran manera a la reducción en la escorrentía, se aumentarían las áreas de retención de agua de lluvia en las ciudades, y la tasa de evapotranspiración, lo cual a su vez contribuye en la reducción de las temperaturas en el interior de las estructuras. Esta disminución en temperatura contribuye en la reducción de la energía eléctrica necesaria para enfriamiento en los edificios, y a una disminución en el combustible fósil utilizado para la generación de esta energía. Transferir estos procesos hacia la superficie de los techos es una nueva opción para manejo de agua de lluvia, al convertir el espacio del techo en superficie de retención.

## LITERATURA CITADA

- Ahmad, S., & Hashim, N.M. (2007). Effect of soil moisture on urban heat island occurrences: Case of Selangor, Malaysia. *Humanity & Social Sciences Journal*, 2(2):132-138.
- Akimoto, J. (2003). Global air quality and pollution. *Science Magazine's: State of the Planet*, 302(5651):79-87. doi: 10.1126/science.1092666
- Banting, D., Doshi, H., Li, J., & Missios, P. (2005). *Report on the Environmental Benefits and Cost of Green Roof Technology for the City of Toronto*. Ryerson University, Toronto.
- Bliss, D.J. (2007). Stormwater runoff mitigation and water quality improvements through the use of a green roof in Pittsburgh, Pennsylvania. Dissertation of Publicized Master Thesis. Faculty of the School of Engineering. University of Pittsburgh, Pennsylvania.
- Carter, T., & Buttler, C. (2008). Ecological impacts of replacing traditional roof with green roofs in two urban areas. *Cities and the Environment*, 1(2):1-17.
- Carter, T.L., & Rasmussen, T.C. (2006). Hydrologic behavior of vegetated roofs. *Journal of the American Water Resources Association*, 42(5):1261-1274. doi: 10.1111/j.1752-1688.2006.tb05611.x
- Che-Ani, A.I., Shahmohamadi, P., Sairi, A., Mohd-Nor, M.F.I., Zain, M.F.M., & Surat, M. (2009). Mitigating the urban heat island effect: Some points without altering existing city planning. *European Journal of Scientific Research*, 35(2):204-216.
- Compton, J. (2006). Rethinking the green roof. *BioCycle*, 47(9): 38-41.
- Emilsson, T. (2005). *Extensive Vegetated Roofs in Sweden: Establishment, Development, and Environmental Quality*. Dissertation of Publicized Doctoral Thesis. Faculty of Landscaping Planning, Horticulture, and Agricultural Sciences. Swedish University of Agricultural Sciences, Alnarp, Sweden.
- Emilsson, T., & Rolf, K. (2005). Comparison of establishment methods for extensive green roofs in southern Sweden. *Urban Forestry & Urban Greening*, 3:103-111. doi:10.1016/j.ufug.2004.07.001
- DeNardo, J.C., Jarrett, A.R., Manbeck, H.B., Beattie, D.J., & Berghage, R.D. (2005). Stormwater mitigation and surface temperature reduction by green roofs. *Transactions of ASAE*, 48(4):1401-146. doi: 10.1016/j.ecoleng.2007.01.009
- Environmental Protection Agency. (2009). *Green roofs for stormwater runoff control*. (EPA/600/r-09/026). Cincinnati, Ohio: Office of Research and Development.

- Estado Libre Asociado de Puerto Rico. (2004). *Ley Sobre Política Pública Ambiental del 22 de septiembre de 2004*. Ley Núm.416.
- Frazer, L. (2005). Paving paradise: The peril of impervious surfaces. *Environmental Health Perspectives*, 113(7):456-462.
- Gaffin, S.R., Khanbilvardi, R., & Rosenzweig, C. (2009). Development of a green roof environmental monitoring and meteorological network in New York, City. *Sensors*, 9(4):2647-2660. doi:10.3390/s90402647
- Gedge, D., & Kadas, G. (2005). Green roofs and biodiversity. *Biologist*, 52(3):161-169.
- Getter, K.L., & Rowe, D.B. (2006). The role of extensive green roofs in sustainable development. *HortScience*, 41(5):1276-1285.
- Grant, G., Engleback, L., & Nicholson, B. (2005). *Green Roofs: Their Existing and Potential for Conserving Biodiversity in Urban Areas*. Peterborough: English Nature, Northminster House.
- IPCC (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis*. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. IPCC, Ginebra, Suiza.
- Hoffman, L. (2006). Green roof: Storm water modeling. *Bio Cycle*, 42(2): 38-40.
- Junta de Calidad Ambiental. (1995). *Reglamento para el Control de la Contaminación Atmosférica*. Reglamento Núm. 5300.
- Junta de Calidad Ambiental. (2003). *Reglamento de Estándares para la Calidad de Agua de Puerto Rico*. Reglamento Núm. 4282.
- Jones, C. (2008). Irrigation systems. *Green Roofs for Healthy Cities: Living Architecture Monitor*, 10(2):30-32.
- Karl, T.R., & Trenberth, K. E. (2003). Modern global climate change. *Science*, 302, 1719-1723. doi:10.1126/science.1090228
- Kloss, C., & Calaruse, C. (2006). Roof tops to rivers: Green strategies for controlling stormwater and combined sewer overflows. *Natural Resources Defense Council*. New York.
- Kluger, J. (2007). When a planet fights a fever. *Time: Global Warming*. New York: Times Books

- Laar, M., & Grimme, F.W. (2006). Thermal comfort and reduced flood risk through green roofs in the tropics. *The 23<sup>rd</sup> Conference on Passive and Low Energy Architecture*. Geneva, Switzerland.
- Liptan, T., & Murase, R. K. (2002). Water gardens as stormwater infrastructure. *Handbook of Water Sensitive Planning and Design*. Oregon: Lewis Publishers.
- Liu, K. (2002). Energy efficiency and environmental benefits of rooftop gardens. *National Council*. Canada. 44(2):1-11.
- Martin, B.K. (2008). *The dynamic stormwater response of a green roof*. Master of Landscape Architecture Thesis Dissertation. School of Environmental Design and Rural Development. University of Guelph. Ontario, Canada.
- Mather, D. (2006). Compost utilization goes through the roof. *BioCycle*, 47(3): 37-42.
- Matos, I. (2007). El calentamiento global y el cambio climático, su influencia en la actividad ciclónica, las sequías y las inundaciones. *Dimensión, Revista del Colegio de Ingenieros y Agrimensores de Puerto Rico*, 21(3):23-24.
- McCracken, M. C. (2005). *Climate change and global warming*. *Encyclopedia of World Climatology* 3<sup>rd</sup> edition. New York, Springer.
- Méndez Tejada, R. (2007). El calentamiento global y su impacto en Puerto Rico. *Revista del CIAPR*, 21(3):17-19.
- Molloy, J., & Albert, R. (2007). From grey to green. *Green Roof for Healthy Cities: Living Architecture Monitor*, 10(2):50-51
- Obendorfer, E., Lundholm, J., Brass, B., Coffman, R. R, Doshi, H., Dunnet, D., ...Rowe, B. (2007). Green roofs as urban ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services. *BioScience*, 57(10):823-833. doi: 10.1641/B571005
- Retzlaff, B., Simmons, M., Forrester, K., Woods, E., & Lockett, K. (2007). Will my green roof reduce stormwater runoff? *Green Roof for Healthy Cities: Living Architecture Monitor*, 10(2):34-37.
- Rosenzweig, C., Solecki, W., & Slosberg, R. (2006). Mitigating New York City's heat island with urban forestry, Living Roofs, and Light Surfaces. (NYSERDA Report 06-06) Albany, NY: New York State Energy Research and Development Authority.
- Sherman, R. (2005). Compost plays key role in green roof mixes. *BioCycle*, 46(3):29-34.
- Shufro, C. (2005). Living roofs. *Environmental Magazine*, 16 (4): 18-20.
- Sonne, J. (2002). Evaluating green roof energy performance. *ASHRAE Journal*, 48(2):59-61.

- Stavins, R.N. (2004). Forging a more effective global climate treaty. *Environment*, 46(10):23-30
- Taylor, D. A. (2007). Growing green roof, city by city. *Environmental Health Perspectives*, 115(6):307-311.
- Taylor, B.L. and Gangnes, D.A. (2004). Method for quantifying runoff reduction of green roofs. Magnusson Klemencic Association: Portland, Oregon.
- Titus, J.G. (2005). Greenhouse effect and global warming. *Encyclopedia of Coastal Sciences*. New York, Springer.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2002). *Clean Water Act*. 33 U.S.C.A § 1251-1387.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2004). *Clean Air Act*. 42 U.S.C.A § 7401 et seq.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2007). Heat island effect. Extraído en febrero 13, 2008 de <http://www.epa.gov/heatisland/about>
- VanWoert, N. D., Rowe, D. B., Andresen, J.A., Rugh, C.L., Fernandez, R.T., & Xiao, L. (2005). Green roof stormwater retention: Effects of roof surface, slope, and media depth. *Environmental Quality*, 34:1036-1044. doi: 10.2134/jeq2004.0364
- Van Linden, K., & Stone, M. (2009). Treatment performance of an extensive vegetated roof in Waterloo, Ontario. *Water Quality Research Journal of Canada*, 44(1):26-32.
- Villareal, E. (2007). Runoff detention effect of a Sedum green roof. *Nordic Hydrology*, 38(1): 99-105. doi:10.2166/nh.2007.031
- Watchel, J. (2007). Storm water management, green roof style. *BioCycle*, 48(5):42-46.

**TABLAS**

Tabla 1.

*Retención de agua de lluvia para el techo con cubierta vegetal y el techo con cubierta de aislación sintética (techo control).*

Eventos de Lluvia	Precipitación (mm)	Escorrentía		Retención		% Retención	
		Techo Verde (mm)	Techo Control (mm)	Techo Verde (mm)	Techo Control (mm)	Techo Verde (%)	Techo Control (%)
6/mayo/08	3.05	0.00	2.96	3.05	0.09	100.0	2.95
13/mayo/08	7.63	1.56	7.61	6.07	0.02	79.6	0.26
22/mayo/08	54.86	31.91	53.52	22.95	1.34	41.8	2.44
23/mayo/08	64.70	40.46	63.37	24.24	1.33	37.5	2.06
27/mayo/08	2.54	0.00	2.49	2.54	0.05	100.0	1.97
29/mayo/08	76.20	58.20	74.29	24.00	1.91	23.6	2.51
30/mayo/08	15.24	6.95	14.34	8.29	0.90	54.4	5.91
2/junio/08	58.42	41.96	56.36	16.46	2.06	28.2	3.53
3/junio/09	49.78	27.39	48.83	22.39	0.95	45.0	1.91
4/junio/08	53.34	32.08	52.50	21.26	1.14	39.9	2.14
5/junio/08	43.18	19.93	42.56	23.25	0.62	53.8	1.44
9/junio/08	33.02	22.52	32.04	29.50	0.98	31.8	2.97
24/junio/08	80.01	56.08	79.48	23.93	0.53	29.9	0.66
27/junio/08	0.25	0.00	0.00	0.25	0.25	100.0	1.00
1/julio/08	15.24	7.29	14.79	7.95	0.54	52.2	3.54
2/julio/08	2.54	0.00	2.49	2.54	0.05	10.2	1.97
3/julio/09	2.29	1.68	2.20	0.61	0.09	26.6	3.93
10/julio/08	2.54	0.00	2.40	2.54	0.14	12.4	5.51
15/julio/08	2.54	0.00	0.00	2.54	2.54	10.2	1.00
21/julio/08	91.44	63.51	90.37	27.93	1.07	30.5	1.17
24/julio/08	139.70	117.20	139.20	22.50	0.50	16.1	0.36
25/julio/08	114.30	92.30	112.10	22.00	2.20	19.2	1.92
28/julio/08	25.40	16.10	24.18	9.30	1.22	36.6	4.80
31/julio/08	10.16	5.25	9.87	4.91	0.29	48.3	2.85
1/agosto/08	15.75	7.46	14.90	8.29	0.85	52.6	5.40

Tabla 1.

*Retención de agua de lluvia para el techo con cubierta vegetal y el techo con cubierta de aislación sintética (techo control). Continuación.*

Eventos de Lluvia	Precipitación (mm)	Escorrentía		Retención		% Retención	
		Techo Verde (mm)	Techo Control (mm)	Techo Verde (mm)	Techo Control (mm)	Techo Verde (%)	Techo Control (%)
4/agosto/08	3.81	0.61	3.72	3.20	0.09	84.0	2.36
12/agosto/08	5.08	0.00	4.36	5.08	0.28	100.0	5.51
15/agosto/08	51.31	33.31	50.72	18.00	0.59	35.0	1.15
18/agosto/08	5.08	0.00	4.85	5.08	0.23	100.0	4.53
21/agosto/08	1.02	0.00	0.00	1.02	1.02	100.0	1.00
25/agosto/08	35.56	19.50	34.00	16.06	1.56	45.2	4.39
26/agosto/08	4.57	2.84	4.54	1.73	0.03	37.8	0.66
27/agosto/08	0.76	0.00	0.00	0.76	0.76	100.0	1.00
3/septiembre/08	12.70	4.93	12.55	7.77	0.15	61.2	1.18
4/septiembre/08	25.40	16.10	24.18	9.30	1.22	36.6	4.80
5/septiembre/08	0.25	0.00	0.00	0.25	0.25	100.0	1.00
8/septiembre/08	12.70	4.95	12.55	7.75	0.15	61.0	1.18
9/septiembre/08	0.25	0.00	0.00	0.25	0.25	100.0	1.00
15/septiembre/08	43.18	20.81	42.59	22.37	0.59	51.8	1.37
16/septiembre/08	2.54	1.35	2.45	1.19	0.21	46.8	3.54
17/septiembre/08	1.78	0.00	0.00	1.78	1.78	100.0	1.00
22/septiembre/08	76.20	51.20	75.68	25.00	0.52	32.8	0.68
25/septiembre/08	2.54	0.00	0.00	2.54	2.54	100.0	1.00
29/septiembre/08	7.62	0.84	6.48	7.45	0.17	89.0	2.23
6/octubre/08	0.25	0.00	0.00	0.25	0.25	100.0	1.00
7/octubre/08	2.54	0.00	2.46	2.54	0.08	100.0	3.15
8/octubre/08	7.62	0.79	7.43	6.83	0.19	89.6	2.49
9/octubre/08	5.08	0.00	4.81	5.08	0.27	100.0	5.31



Tabla 1.

*Retención de agua de lluvia para el techo con cubierta vegetal y el techo con cubierta de aislación sintética (techo control). Continuación.*

Eventos de Lluvia	Precipitación (mm)	Escorrentía		Retención		% Retención	
		Techo Verde (mm)	Techo Control (mm)	Techo Verde (mm)	Techo Control (mm)	Techo Verde (%)	Techo Control (%)
13/octubre/08	35.56	19.65	34.15	15.91	1.41	44.7	3.97
14/octubre/08	0.28	0.00	0.00	0.28	0.28	100.0	1.00
15/octubre/08	7.62	1.52	7.17	6.10	0.45	80.1	5.90
16/octubre/08	5.08	0.81	4.93	4.27	0.15	84.1	2.95
20/octubre/08	6.35	0.25	5.78	6.10	0.25	96.1	3.94
29/octubre/08	25.65	15.72	24.43	9.93	1.22	38.7	4.76
30/octubre/08	1.52	0.00	1.47	1.52	0.05	100.0	3.29
31/octubre/08	7.62	0.85	7.40	6.77	0.22	88.8	2.89
5/noviembre/08	7.62	0.62	7.55	7.00	1.07	91.9	0.92
7/noviembre/08	2.54	0.00	0.00	2.54	2.54	100.0	1.00
11/noviembre/08	2.29	0.00	0.00	2.29	2.29	100.0	1.00
13/noviembre/08	12.70	4.68	12.45	8.02	0.25	63.1	1.97
14/noviembre/08	5.08	0.84	4.86	4.24	0.22	83.5	4.33
17/noviembre/08	12.70	7.22	12.33	5.48	0.37	43.1	2.91
21/noviembre/08	63.50	38.74	63.23	24.76	0.27	39.0	0.43
24/noviembre/08	12.70	4.33	12.48	8.37	0.22	65.9	1.73
2/diciembre/08	7.62	0.85	7.48	6.77	0.14	88.8	1.84
4/diciembre/08	15.24	7.09	15.12	8.00	0.12	53.5	0.79
5/diciembre/08	3.81	2.34	3.73	1.47	0.08	38.6	2.10
8/diciembre/08	15.24	7.24	15.05	8.00	0.10	52.5	1.25
9/diciembre/08	2.54	2.14	2.40	0.40	0.15	15.7	5.51
10/diciembre/08	4.32	2.84	4.27	1.48	0.05	34.3	1.16
11/diciembre/08	5.08	0.00	4.83	5.08	0.25	100.0	4.92

Tabla 1.

*Retención de agua de lluvia para el techo con cubierta vegetal y el techo con cubierta de aislación sintética (techo control). Continuación.*

Eventos de Lluvia	Precipitación (mm)	Escorrentía		Retención		% Retención	
		Techo Verde (mm)	Techo Control (mm)	Techo Verde (mm)	Techo Control (mm)	Techo Verde (%)	Techo Control (%)
12/diciembre/08	3.05	0.00	2.96	3.05	0.09	100.0	2.95
15/diciembre/08	24.13	12.88	23.32	11.25	0.81	46.6	3.36
16/diciembre/08	10.16	5.20	9.60	4.96	0.56	48.8	5.51
8/enero/09	68.58	53.10	67.63	15.48	0.95	22.6	1.39
9/enero/09	3.81	2.67	3.74	1.14	0.07	30.0	1.84
12/enero/09	3.81	2.05	3.68	1.76	0.13	46.2	3.41
13/enero/09	2.54	1.56	2.43	0.98	0.11	38.6	4.33
14/enero/09	7.62	2.84	7.50	4.78	0.12	62.7	1.58
15/enero/09	1.27	0.00	0.00	1.27	1.27	100.0	1.00
16/enero/09	7.62	1.86	7.55	5.76	0.07	76.0	0.92
20/enero/09	25.40	16.23	24.15	9.17	1.25	36.1	4.92
21/enero/09	15.24	6.64	14.65	8.60	0.59	56.4	3.87
22/enero/09	5.08	2.87	4.87	2.21	0.21	43.5	4.13
23/enero/09	2.54	2.35	2.48	0.19	0.06	7.5	2.36
26/enero/09	0.25	0.00	0.00	0.25	0.25	100.0	1.00
27/enero/09	3.05	0.00	2.89	3.05	0.16	100.0	5.25
28/enero/09	5.08	2.05	4.86	3.03	0.22	59.6	4.33
29/enero/09	6.35	1.72	6.16	4.63	0.19	72.9	2.99
30/enero/09	3.05	0.00	2.95	3.05	0.63	100.0	3.28
6/febrero/09	1.27	0.00	0.00	1.27	1.27	100.0	1.00
9/febrero/09	43.18	20.83	42.59	22.35	0.59	51.8	1.37
11/febrero/09	22.86	10.16	22.37	12.70	0.49	55.6	2.14
13/febrero/09	0.25	0.00	0.00	0.25	0.25	100.0	1.00

Tabla 1.

*Retención de agua de lluvia para el techo con cubierta vegetal y el techo con cubierta de aislación sintética (techo control). Continuación.*

Eventos de Lluvia	Precipitación (mm)	Escorrentía		Retención		% Retención	
		Techo Verde (mm)	Techo Control (mm)	Techo Verde (mm)	Techo Control (mm)	Techo Verde (%)	Techo Control (%)
16/febrero/09	2.54	0.00	2.40	2.54	0.14	100.0	5.51
18/febrero/09	2.03	0.00	1.95	2.03	0.08	100.0	3.94
19/febrero/09	3.05	0.00	2.89	3.05	0.16	100.0	5.25
3/marzo/09	0.51	0.00	0.00	0.51	0.51	100.0	1.00
14/marzo/09	6.60	2.79	6.55	3.81	0.05	57.7	0.76
18/marzo/09	4.57	2.67	4.54	1.90	0.03	41.6	0.66
20/marzo/09	5.08	2.35	4.90	2.73	0.18	53.7	3.54
30/marzo/09	12.70	4.93	12.58	7.77	0.12	61.2	0.94
6/abril/09	5.08	0.00	4.85	5.08	0.28	100.0	4.53
8/abril/09	1.78	0.00	1.70	1.78	0.08	100.0	4.49
13/abril/09	2.54	0.00	2.45	2.54	0.09	100.0	3.54
14/abril/09	1.02	0.00	0.00	1.02	1.02	100.0	1.00
15/abril/09	3.81	1.78	3.75	2.03	0.06	53.3	1.57
20/abril/09	12.70	7.07	12.55	5.63	0.15	44.3	1.18
22/abril/09	2.54	0.87	2.47	1.67	0.07	65.7	2.76
24/abril/09	2.54	0.64	2.42	1.90	0.12	74.8	4.72
27/abril/09	10.16	2.79	9.96	7.37	0.20	72.5	1.97
29/abril/09	12.70	3.16	12.56	9.54	0.14	75.1	1.10
Promedio:	16.8	9.7	16.2	7.3	0.6	65.6	2.6
Total	1895.3	1098.9	1832.2	796.4	63.1	7408.3	289.7

Tabla 2.

*Variación en la temperatura ambiental y temperaturas interiores para el techo con cubierta vegetal y con cubierta de aislación sintética durante la mañana para el mes de mayo. (n=15)*

Fecha	Temperatura Ambiental (°F)	Temperatura Interior Techo Cubierta Vegetal (°F)	Temperatura Interior Cubierta Aislación Sintética (°F)	Temperatura Exterior Cubierta Vegetal (°F)	Temperatura Exterior Cubierta Aislación Sintética (°F)
5/mayo/2008	76.1	77.5	79.5	78.4	80.2
6/mayo/2008	78.4	73	77.5	75.5	70.5
7/mayo/2008	72.3	74	77.5	76.3	78.8
8/mayo/2008	71.8	74	77	72.6	72.8
9/mayo/2008	74.5	76	77.5	74.3	76.5
12/mayo/2008	76.2	75	77.5	75.3	75.3
13/mayo/2008	70.2	77	80.5	83.8	78.8
21/mayo/2008	78.6	74	78.5	75.5	70.5
22/mayo/2008	72.3	75	78.5	76.3	65.4
23/mayo/2008	67.9	72.5	77.5	73.8	72.3
26/mayo/2008	78.7	76	80.5	76.8	76.3
27/mayo/2008	77.5	77.5	80.5	73.2	75.2
28/mayo/2008	70.2	77	80.5	83.8	78.8
29/mayo/2008	78.6	77	81.5	79.4	70.5
30/mayo/2008	79.1	75	81.5	76.8	76.5

Tabla 3.

*Variación en la temperatura ambiental y temperaturas interiores para el techo con cubierta vegetal y con cubierta de aislación sintética durante el mediodía para el mes de mayo. (n=15)*

Fecha	Temperatura	Temperatura Interior		Temperatura Exterior	
	Ambiental (°F)	Techo Cubierta Vegetal (°F)	Cubierta Aislación Sintética (°F)	Cubierta Vegetal (°F)	Cubierta Aislación Sintética (°F)
5/mayo/2008	85.8	80.5	80.5	80.7	115.7
6/mayo/2008	86.8	78	80.5	80.6	112.5
7/mayo/2008	87	77.5	80.5	81	110.8
8/mayo/2008	78.3	77.5	78.5	74.3	109.4
9/mayo/2008	79.3	77.5	78.5	75.5	93.5
12/mayo/2008	80.8	77	78.5	75.3	112.6
13/mayo/2008	89.4	81.5	83	84	112.7
21/mayo/2008	75.1	78.5	79.5	81.4	114.6
22/mayo/2008	76.6	75	80.5	77.4	77.8
23/mayo/2008	79.1	76	81.5	76.4	95.3
26/mayo/2008	88.9	84	81.5	82.5	108.8
27/mayo/2008	85.3	83	84	87.1	111.9
28/mayo/2008	89.4	80.5	83	83.4	112.6
29/mayo/2008	88.7	81.5	83	83.7	90.8
30/mayo/2008	89	80.5	83	82.5	109.7

Tabla 4.

*Variación en la temperatura ambiental y temperaturas interiores para el techo con cubierta vegetal y con cubierta de aislación sintética durante la tarde para el mes de mayo. (n=15)*

Fecha	Temperatura	Temperatura Interior		Temperatura Exterior	Temperatura Exterior
	Ambiental (°F)	Techo Cubierta Vegetal (°F)	Cubierta Aislación Sintética (°F)	Cubierta Vegetal (°F)	Cubierta Aislación Sintética (°F)
5/mayo/2008	81.1	80.5	81.5	81.1	93.2
6/mayo/2008	80.1	77	77.5	82.1	89.6
7/mayo/2008	80.9	77.5	80.5	82	93.5
8/mayo/2008	77	75.5	78.5	76.8	84.3
9/mayo/2008	71.6	77.5	76.5	75.4	72.5
12/mayo/2008	77.2	77	79.5	76.2	84.3
13/mayo/2008	83	80.5	83	84	90.8
21/mayo/2008	85.3	77.5	84	83.8	89.6
22/mayo/2008	68.6	75	80.5	72.5	78.8
23/mayo/2008	70.2	75	82	77.9	82.5
26/mayo/2008	87.2	80.5	85	83.4	93.7
27/mayo/2008	79.3	80.5	86	89.9	96.2
28/mayo/2008	85.3	80.5	86.5	83.8	89.6
29/mayo/2008	87.1	80.5	83	83.3	93.5
30/mayo/2008	86.9	78.5	85	83	92.3

Tabla 5.

*Variación en la temperatura ambiental y temperaturas interiores y exteriores para el techo con cubierta vegetal y con cubierta de aislación sintética durante la mañana para el mes de agosto. (n=18)*

Fecha	Temperatura	Temperatura Interior	Temperatura Interior	Temperatura Exterior	Temperatura Exterior
	Ambiental (°F)	Techo Cubierta Vegetal (°F)	Cubierta Aislación Sintética (°F)	Cubierta Vegetal (°F)	Cubierta Aislación Sintética (°F)
1/agosto/2008	78.1	78.5	83	82.3	77.7
4/agosto/2008	75.2	77.5	81.5	81.3	75.6
6/agosto/2008	82.8	79.5	84	83.3	79.5
7/agosto/2008	82.3	79.8	83	82.5	78.8
8/agosto/2008	82.8	81.5	82.5	85.6	84.7
11/agosto/2008	83	80.2	84	82.6	79.7
12/agosto/2008	83.3	82	82	85.4	85.6
14/agosto/2008	84.4	82	81.5	84.3	83
18/agosto/2008	72.9	79.5	84	82	75.3
19/agosto/2008	81.9	80.5	84	84	80.2
20/agosto/2008	76.2	80.5	83	85.8	79.8
21/agosto/2008	85.8	80.5	85	85	83.4
22/agosto/2008	86.4	81.5	85	85.8	84.3
25/agosto/2008	81.3	80.5	85	85	83.1
26/agosto/2008	76.1	81.5	86	85.7	79.8
27/agosto/2008	77.7	77.5	81.5	82.9	77.8
28/agosto/2008	86.4	79.5	84	86.2	80
29/agosto/2008	83.7	79.5	83	82.8	84.3

Tabla 6.

*Variación en la temperatura ambiental y temperaturas interiores y exteriores para el techo con cubierta vegetal y con cubierta de aislación sintética durante el mediodía para el mes de agosto. (n=18)*

Fecha	Temperatura	Temperatura Interior	Temperatura Interior	Temperatura Exterior	Temperatura Exterior
	Ambiental (°F)	Techo Cubierta Vegetal (°F)	Cubierta Aislación Sintética (°F)	Cubierta Vegetal (°F)	Cubierta Aislación Sintética (°F)
1/agosto/2008	84.6	81.5	86.5	88.1	86.2
4/agosto/2008	87.6	81.5	84	87.2	105.8
6/agosto/2008	92.5	84	86	89.8	115.6
7/agosto/2008	90	83	84	90.6	108
8/agosto/2008	90	84	85	89.3	116.9
11/agosto/2008	90.7	81.5	85	90.6	110.9
12/agosto/2008	87.6	79.5	85	88.5	108.3
14/agosto/2008	88.2	82	84	88.8	118.2
18/agosto/2008	82.9	79.5	83	83.2	93.2
19/agosto/2008	87.3	84	85	90.8	114.6
20/agosto/2008	88.7	83	86.5	88.8	118.6
21/agosto/2008	90	85	86.5	90.8	125.6
22/agosto/2008	90.5	85	86	90.7	123.7
25/agosto/2008	92.7	85	86.5	90.5	122.6
26/agosto/2008	87.1	82	86	88.2	98.9
27/agosto/2008	83.1	83	86.5	87.6	94.7
28/agosto/2008	91.4	81.5	83	87.9	118.6
29/agosto/2008	89.6	83	84	90.2	121.1



Tabla 7.

*Variación en la temperatura ambiental y temperaturas interiores y exteriores para el techo con cubierta vegetal y con cubierta de aislación sintética durante la tarde para el mes de agosto. (n=18)*

Fecha	Temperatura	Temperatura Interior	Temperatura Interior	Temperatura Exterior	Temperatura Exterior
	Ambiental (°F)	Techo Cubierta Vegetal (°F)	Cubierta Aislación Sintética (°F)	Cubierta Vegetal (°F)	Cubierta Aislación Sintética (°F)
1/agosto/2008	74.8	80.5	86	87.4	79.5
4/agosto/2008	83.8	81.5	85	88	94.1
6/agosto/2008	90.9	85	85.6	90.6	99.2
7/agosto/2008	87.6	84	85	91	98.9
8/agosto/2008	85.1	84	86	90.7	96.3
11/agosto/2008	87.6	83	85	91	96.8
12/agosto/2008	85.6	84	87.5	89.7	96.5
14/agosto/2008	79.9	84	85	88.8	88.6
18/agosto/2008	83.1	80.5	83	85.7	88.9
19/agosto/2008	83.1	83	87.5	90.8	92.1
20/agosto/2008	86.9	82	83	89.8	93.8
21/agosto/2008	87.1	84	89.5	90.8	95.5
22/agosto/2008	84.9	82	84	90.7	98.3
25/agosto/2008	85.3	82	84	91.8	93.6
26/agosto/2008	74.8	80.5	86	87.4	79.5
27/agosto/2008	85.5	81.5	86.5	89.5	92.9
28/agosto/2008	83.7	81.5	84	88.2	91.3
29/agosto/2008	87.1	82	84	90	99.1

Tabla 8

*Variación en la temperatura ambiental y temperaturas interiores y exteriores para el techo con cubierta vegetal y con cubierta de aislación sintética durante la mañana para el mes de noviembre. (n=11)*

Fecha	Temperatura	Temperatura Interior	Temperatura Interior	Temperatura Exterior	Temperatura Exterior
	Ambiental (°F)	Techo Cubierta Vegetal (°F)	Cubierta Aislación Sintética (°F)	Cubierta Vegetal (°F)	Cubierta Aislación Sintética (°F)
5/noviembre/2008	74.8	78.5	78.5	79.7	79.2
6/noviembre/2008	76.5	78.5	78.5	80.4	79.5
7/noviembre/2008	75.9	78.5	78.5	80.4	79
10/noviembre/2008	80.1	80.5	81.5	81.5	79.8
11/noviembre/2008	75.6	78.5	78.5	80.4	79
13/noviembre/2008	76.8	78.5	79.5	80.8	79.2
14/noviembre/2008	81.7	77	77.5	79.3	78
17/noviembre/2008	72.7	77.5	80.5	78.9	74.2
21/noviembre/2008	73.2	77	79.5	74.6	75.4
24/noviembre/2008	77	77	78.5	79.1	82.3
26/noviembre/2008	76.3	75	77.5	75.9	75.5

Tabla 9.

*Variación en la temperatura ambiental y temperaturas interiores y exteriores para el techo con cubierta vegetal y con cubierta de aislación sintética durante el mediodía para el mes de noviembre. (n=11)*

Fecha	Temperatura	Temperatura Interior	Temperatura Interior	Temperatura Exterior	Temperatura Exterior
	Ambiental (°F)	Techo Cubierta Vegetal (°F)	Cubierta Aislación Sintética (°F)	Cubierta Vegetal (°F)	Cubierta Aislación Sintética (°F)
5/noviembre/2008	85.6	79.5	81.5	84	106.1
6/noviembre/2008	84.9	77.5	83	84.9	107.3
7/noviembre/2008	84.4	78.5	81.5	84.3	100.3
10/noviembre/2008	85.3	79.5	82	85.2	115.6
11/noviembre/2008	84.4	80.5	82	84.2	108.5
13/noviembre/2008	83.3	78.5	80.5	83.9	112.6
14/noviembre/2008	75	77.5	78.5	79.6	84.4
17/noviembre/2008	83.7	78.5	78.5	84.3	100.6
21/noviembre/2008	82.4	79.5	79.5	84.5	107.2
24/noviembre/2008	81.5	78.5	78.5	79.5	96.4
26/noviembre/2008	82.8	77.5	77.5	79.3	117.6

Tabla 10.

*Variación en la temperatura ambiental y temperaturas interiores y exteriores para el techo con cubierta vegetal y con cubierta de aislación sintética durante la tarde para el mes de noviembre. (n=11)*

Fecha	Temperatura Ambiental (°F)	Temperatura Interior Techo Cubierta Vegetal (°F)	Temperatura Interior Cubierta Aislación Sintética (°F)	Temperatura Exterior Cubierta Vegetal (°F)	Temperatura Exterior Cubierta Aislación Sintética (°F)
5/noviembre/2008	82	78.5	81.5	85.3	89.7
6/noviembre/2008	83.1	78.5	83	85.8	92.3
7/noviembre/2008	82.4	77.5	81.5	85.6	90.8
10/noviembre/2008	82.7	77.5	81.5	85.9	90.5
11/noviembre/2008	82.6	82	82	84.4	90.6
13/noviembre/2008	79.3	78.5	79.5	84.6	82
14/noviembre/2008	80.6	77.5	78.5	80.7	86.9
17/noviembre/2008	80.6	78.5	78.5	78.8	86.5
21/noviembre/2008	81.3	78.5	79.5	80.7	86.9
24/noviembre/2008	78.8	77.5	77.5	79.7	86.9
26/noviembre/2008	79	79.5	77.5	78.6	87.4

Tabla 11.

*Variación en la temperatura ambiental y temperaturas interiores y exteriores para el techo con cubierta vegetal y con cubierta de aislación sintética durante la mañana para el mes de marzo. (n=11)*

Fecha	Temperatura	Temperatura Interior	Temperatura Interior	Temperatura Exterior	Temperatura Exterior
	Ambiental (°F)	Techo Cubierta Vegetal (°F)	Cubierta Aislación Sintética (°F)	Cubierta Vegetal (°F)	Cubierta Aislación Sintética (°F)
3/marzo/2009	76.1	77.5	79.5	78.4	80.2
4/marzo/2009	78.4	73	77.5	75.5	70.5
5/marzo/2009	72.3	74	77.5	76.3	78.8
9/marzo/2009	71.8	74	77	72.6	72.8
10/marzo/2009	74.5	76	77.5	74.3	76.5
11/marzo/2009	76.2	75	77.5	75.3	75.3
14/marzo/2009	70.2	77	80.5	83.8	78.8
17/marzo/2009	78.6	74	78.5	75.5	70.5
18/marzo/2009	72.3	75	78.5	76.3	65.4
19/marzo/2009	67.9	72.5	77.5	73.8	72.3
24/ marzo/2009	78.7	76	80.5	76.8	76.3
25/marzo/2009	77.5	77.5	80.5	73.2	75.2
26/marzo/2009	70.2	77	80.5	83.8	78.8
27/marzo/2009	78.6	77	81.5	79.4	70.5
30/marzo/2009	79.1	75	81.5	76.8	76.5

Tabla 12.

*Variación en la temperatura ambiental y temperaturas interiores y exteriores para el techo con cubierta vegetal y con cubierta de aislación sintética durante el mediodía para el mes de marzo. (n=11)*

Fecha	Temperatura	Temperatura Interior	Temperatura Interior	Temperatura Exterior	Temperatura Exterior
	Ambiental (°F)	Techo Cubierta Vegetal (°F)	Cubierta Aislación Sintética (°F)	Cubierta Vegetal (°F)	Cubierta Aislación Sintética (°F)
3/marzo/2009	85.8	80.5	80.5	80.7	115.7
4/marzo/2009	86.8	78	80.5	80.6	112.5
5/marzo/2009	87	77.5	80.5	81	110.8
9/marzo/2009	78.3	77.5	78.5	74.3	109.4
10/marzo/2009	79.3	77.5	78.5	75.5	93.5
11/marzo/2009	80.8	77	78.5	75.3	112.6
14/marzo/2009	89.4	81.5	83	84	112.7
17/marzo/2009	75.1	78.5	79.5	81.4	114.6
18/marzo/2009	76.6	75	80.5	77.4	77.8
19/marzo/2009	79.1	76	81.5	76.4	95.3
24/ marzo/2009	88.9	84	81.5	82.5	108.8
25/marzo/2009	85.3	83	84	87.1	111.9
26/marzo/2009	89.4	80.5	83	83.4	112.6
27/marzo/2009	88.7	81.5	83	83.7	90.8
30/marzo/2009	89	80.5	83	82.5	109.7

Tabla 13.

*Variación en la temperatura ambiental y temperaturas interiores y exteriores para el techo con cubierta vegetal y con cubierta de aislación sintética durante la tarde para el mes de marzo. (n=11)*

Fecha	Temperatura Ambiental (°F)	Temperatura Interior Techo Cubierta Vegetal (°F)	Temperatura Interior Cubierta Aislación Sintética (°F)	Temperatura Exterior Cubierta Vegetal (°F)	Temperatura Exterior Cubierta Aislación Sintética (°F)
3/marzo/2009	81.1	80.5	81.5	81.1	93.2
4/marzo/2009	80.1	77	77.5	82.1	89.6
5/marzo/2009	80.9	77.5	80.5	82	93.5
9/marzo/2009	77	75.5	78.5	76.8	84.3
10/marzo/2009	71.6	77.5	76.5	75.4	72.5
11/marzo/2009	77.2	77	79.5	76.2	84.3
14/marzo/2009	83	80.5	83	84	90.8
17/marzo/2009	85.3	77.5	84	83.8	89.6
18/marzo/2009	68.6	75	80.5	72.5	78.8
19/marzo/2009	70.2	75	82	77.9	82.5
24/ marzo/2009	87.2	80.5	85	83.4	93.7
25/marzo/2009	79.3	80.5	86	89.9	96.2
26/marzo/2009	85.3	80.5	86.5	83.8	89.6
27/marzo/2009	87.1	80.5	83	83.3	93.5
30/marzo/2009	86.9	78.5	85	83	92.3

**FIGURAS**



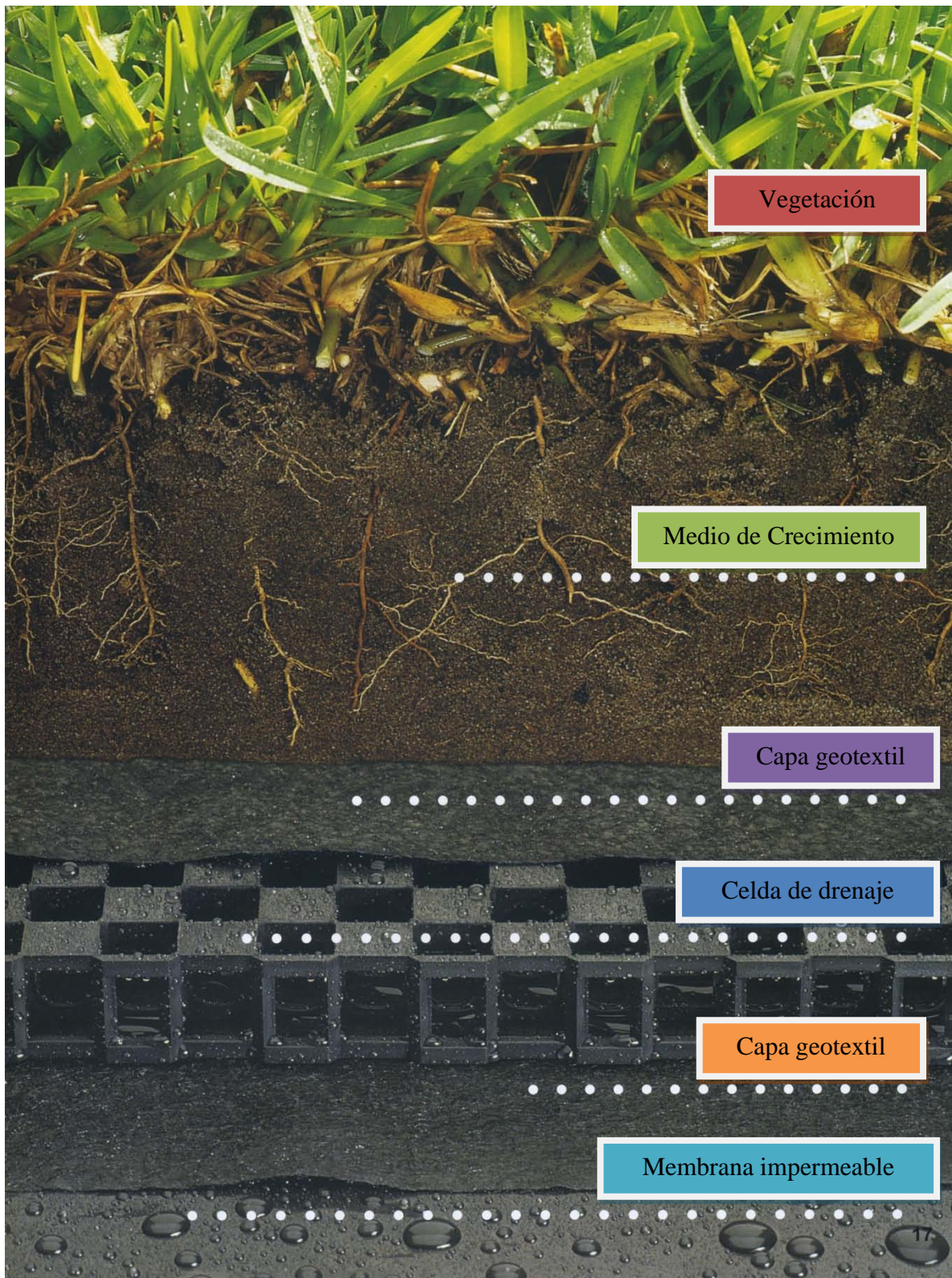
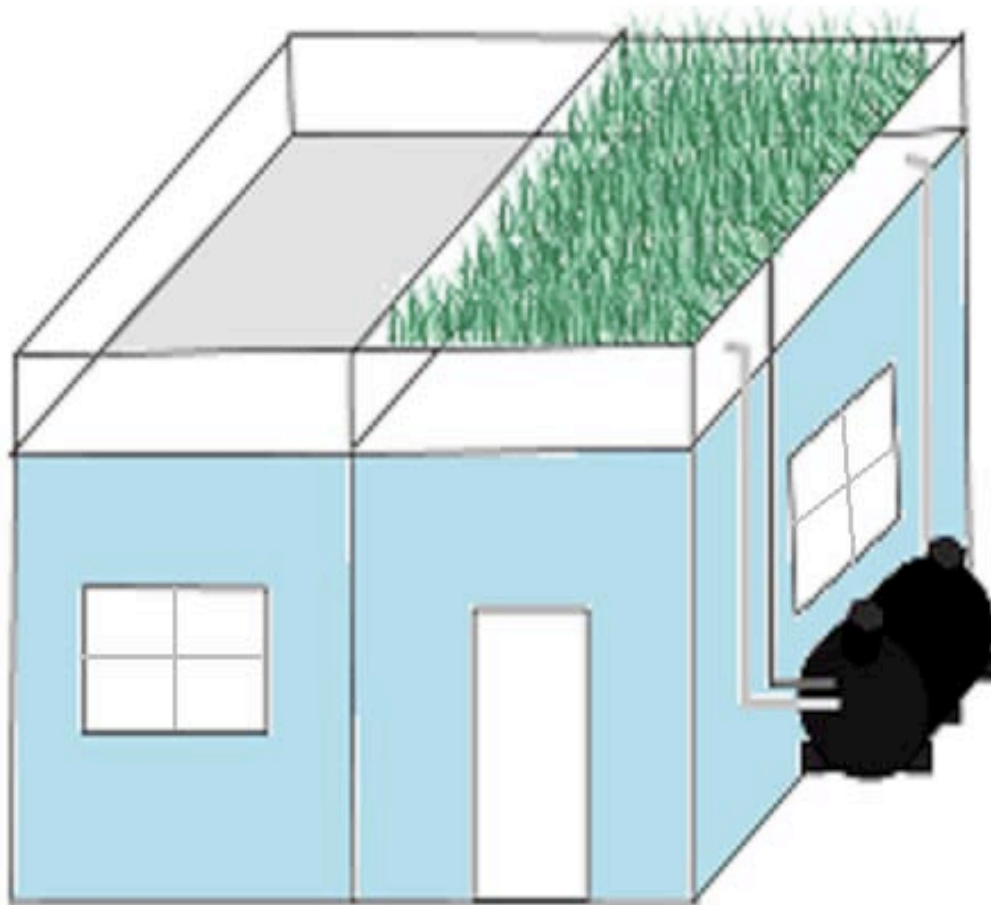


Figura 1. Componentes básicos de un sistema con cubierta vegetal extensiva.



Figura 2. Localización del área de estudio en el municipio de San Juan.



*Figura 3.* Diagrama representativo de un sistema con cubierta vegetal y un techo convencional.

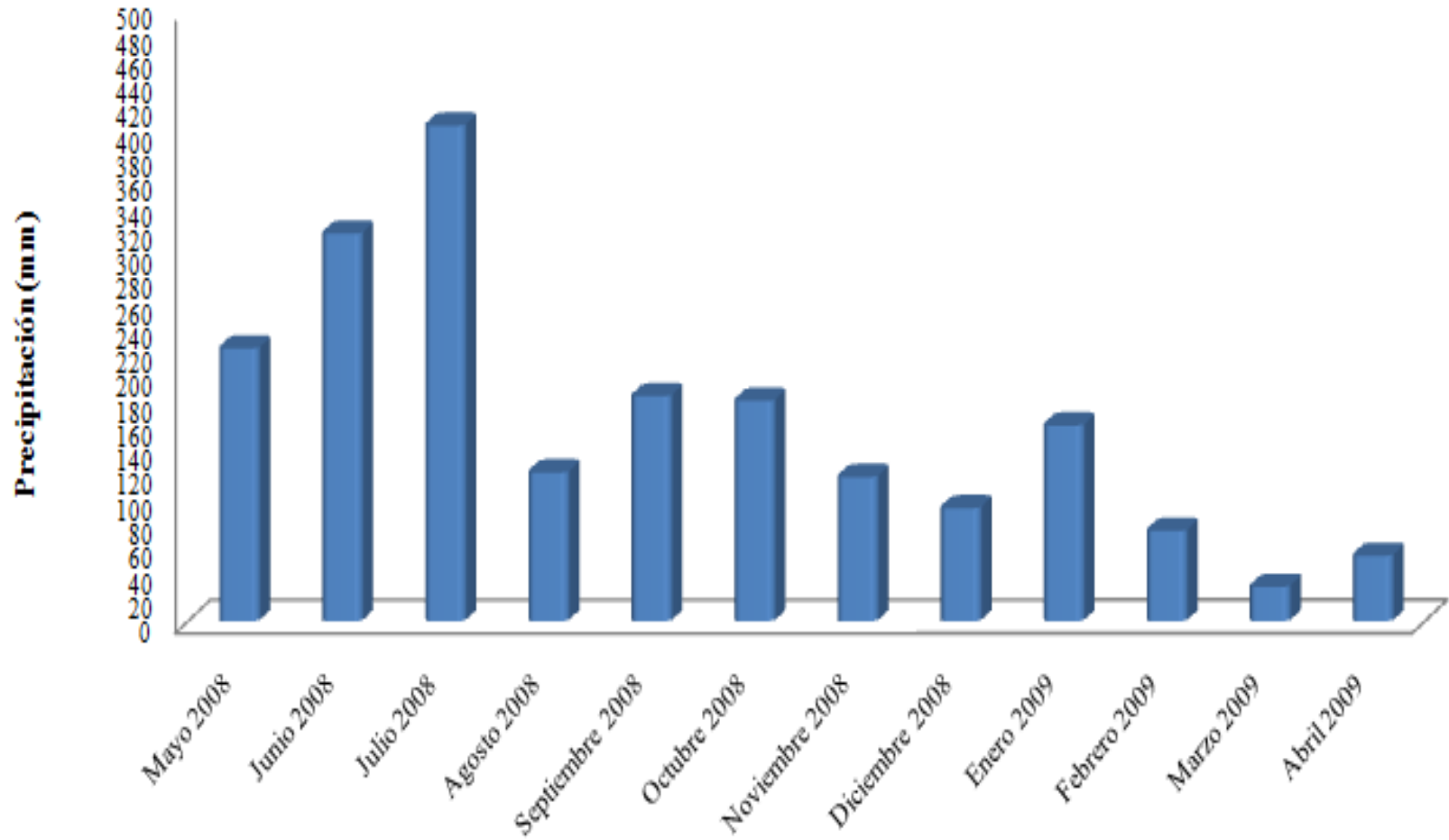


Figura 4. Comparación mensual de la precipitación registrada durante el periodo de estudio. (n=12)

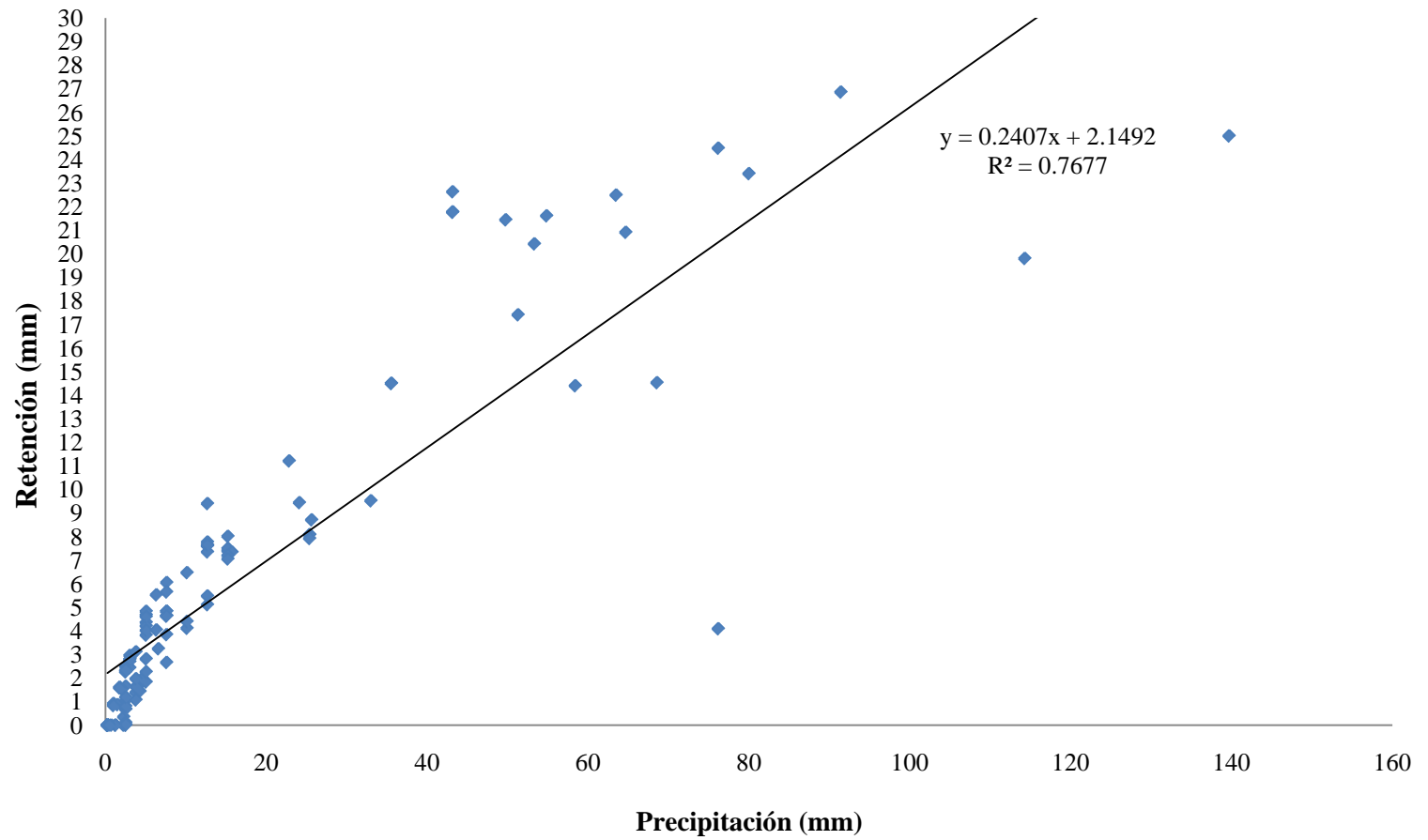


Figura 5. Retención del sistema con cubierta vegetal como función del volumen de precipitación durante el periodo de estudio. (n=113)

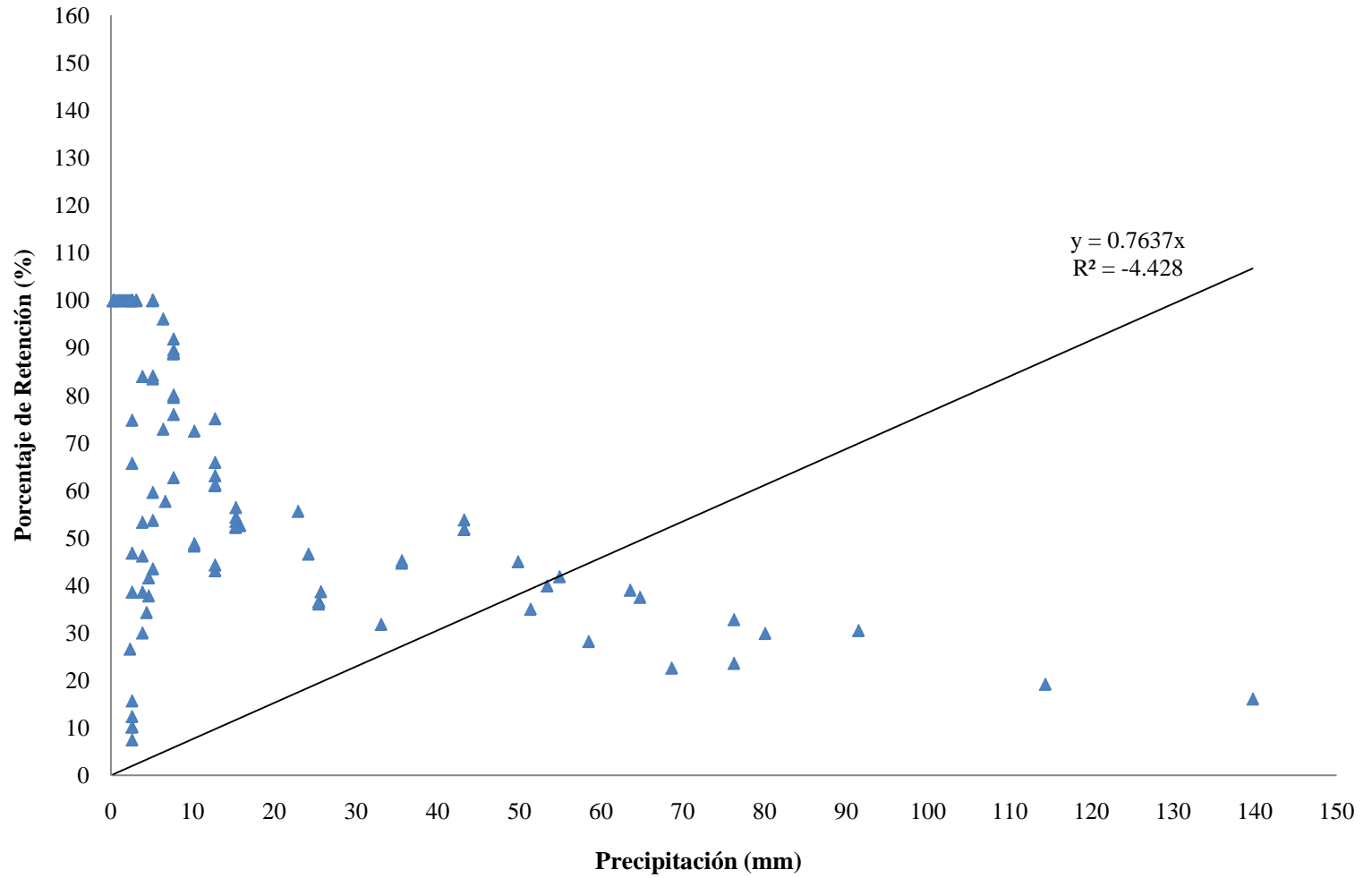


Figura 6. Porcentaje de retención del sistema de techo con cubierta vegetal como función de la precipitación. (n=113)

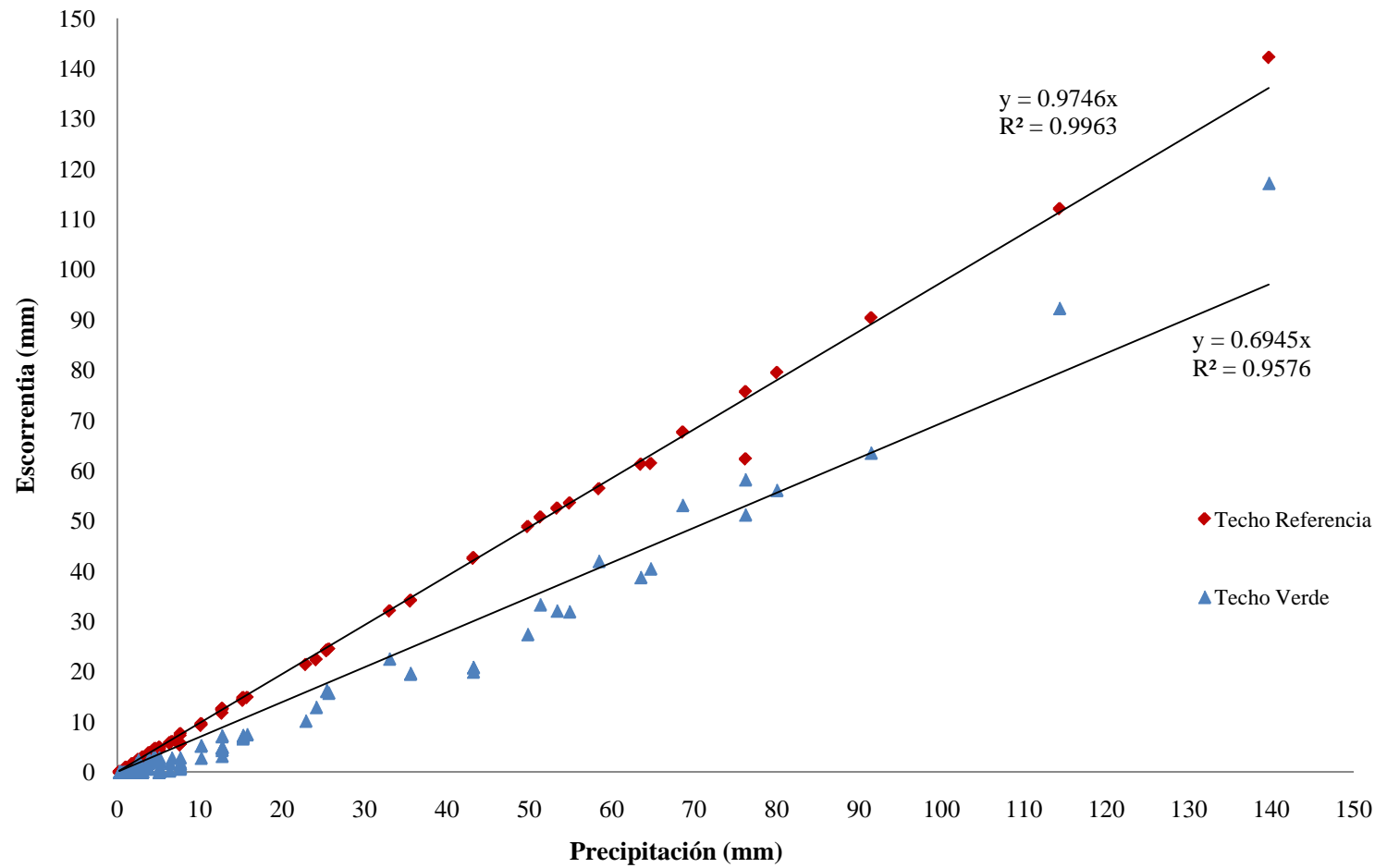


Figura 7. Escorrentía para el sistema con cubierta vegetal y sistema con cubierta de aislación sintética como función de la precipitación. (n=113)

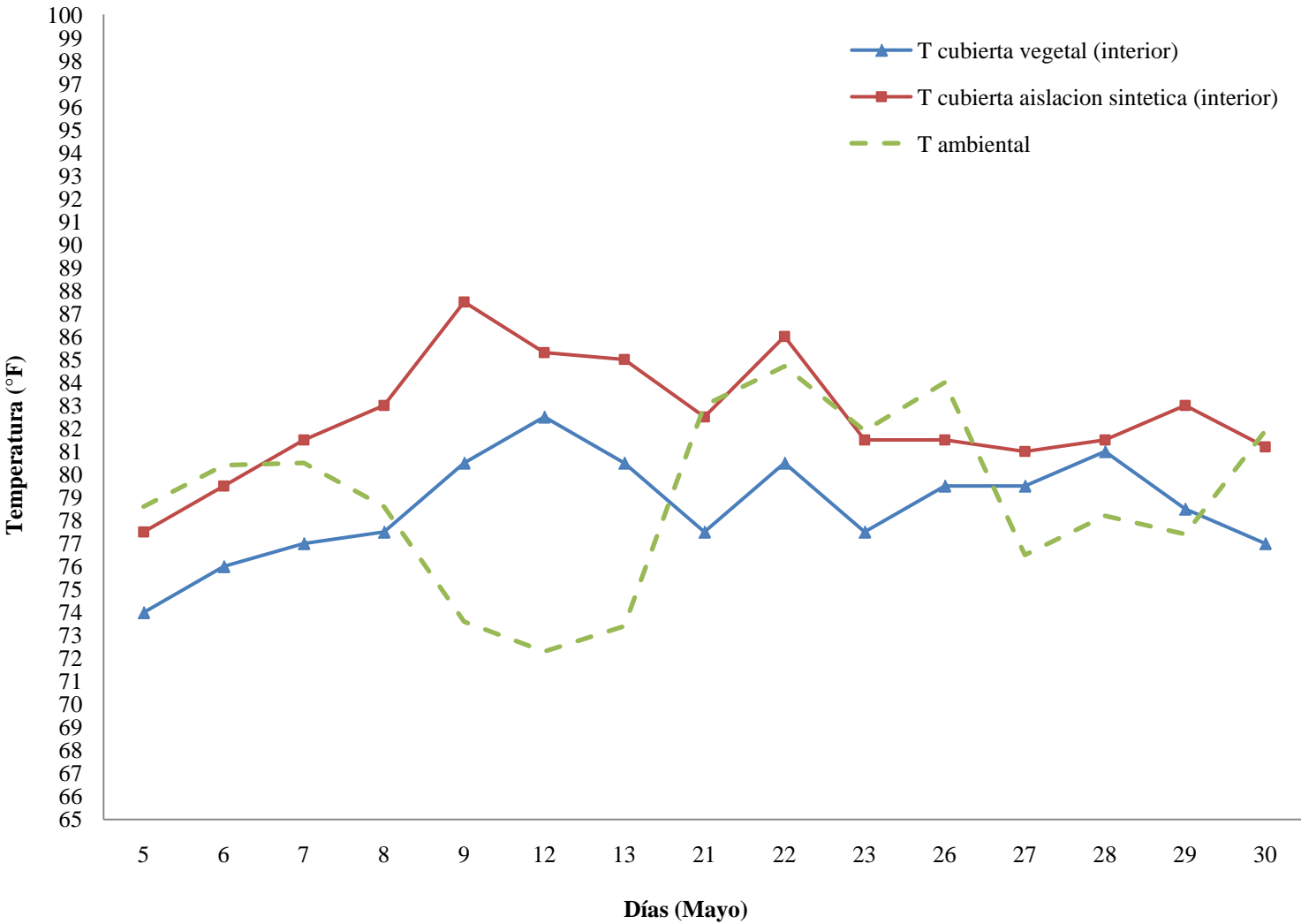


Figura 8. Comparación de temperaturas interiores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante la mañana para el mes de mayo. (n=15)



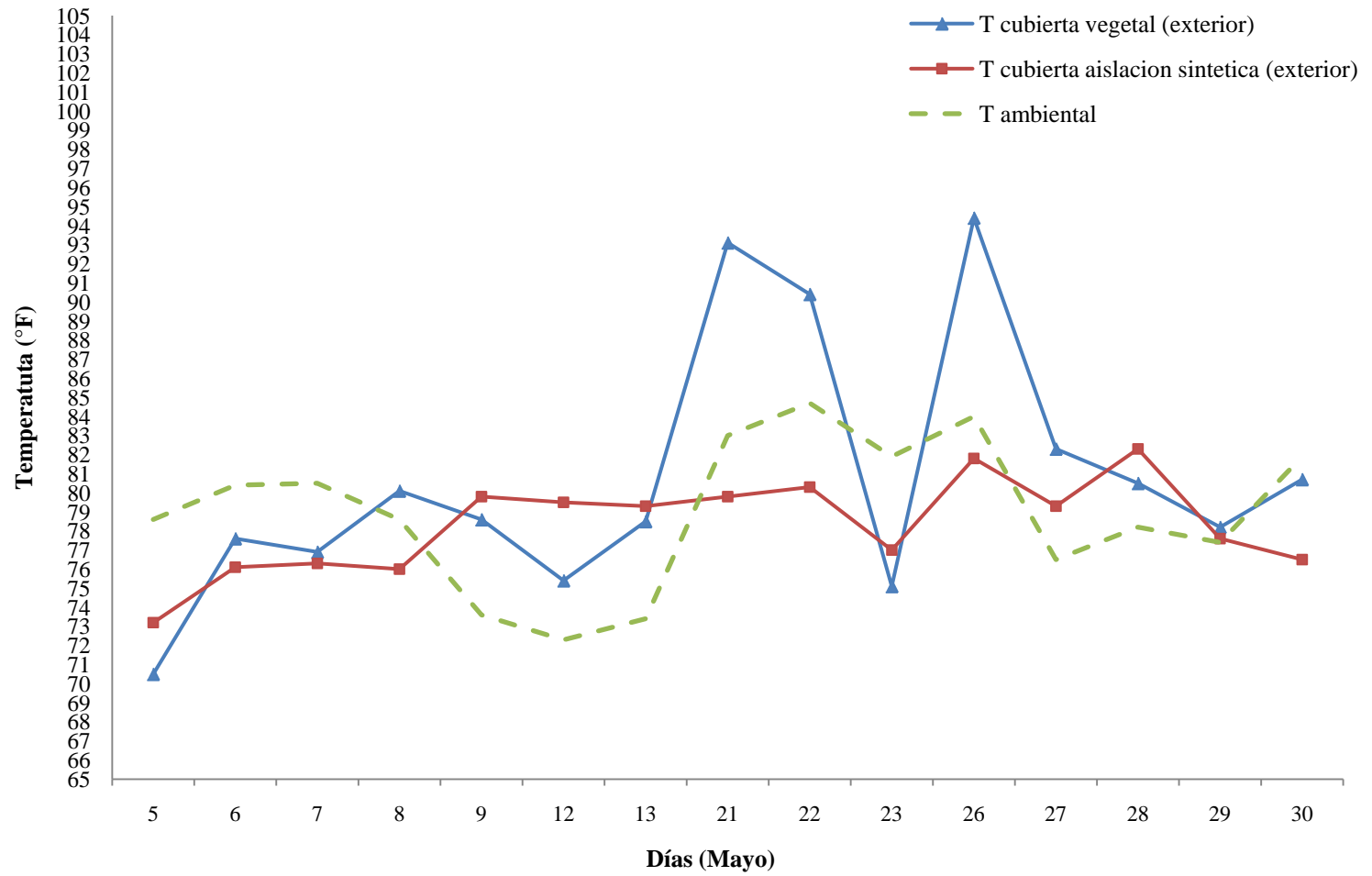


Figura 9. Comparación de temperaturas exteriores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante la mañana para el mes de mayo. (n=15)

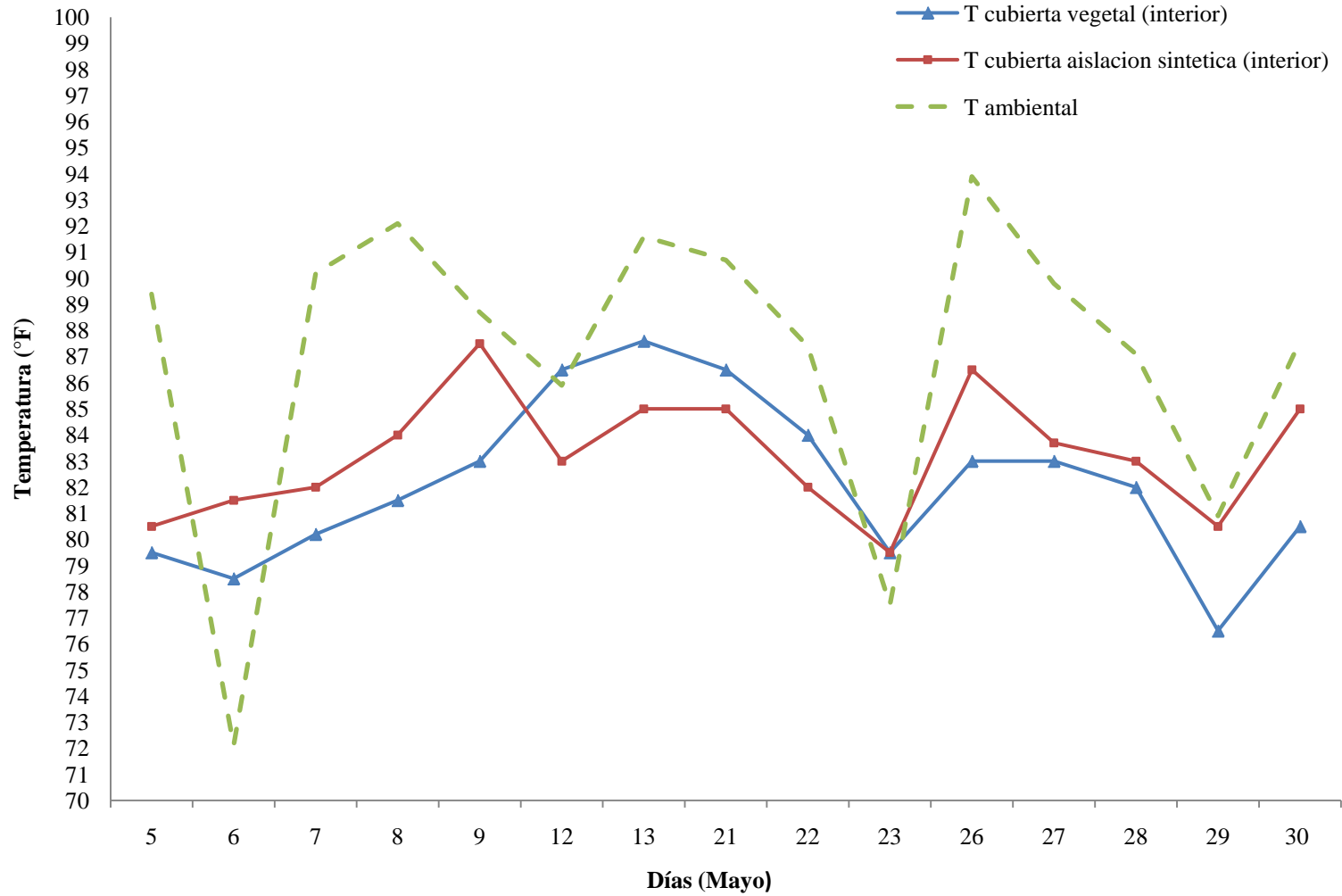


Figura 10. Comparación de temperaturas interiores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante el mediodía para el mes de mayo. (n=15)

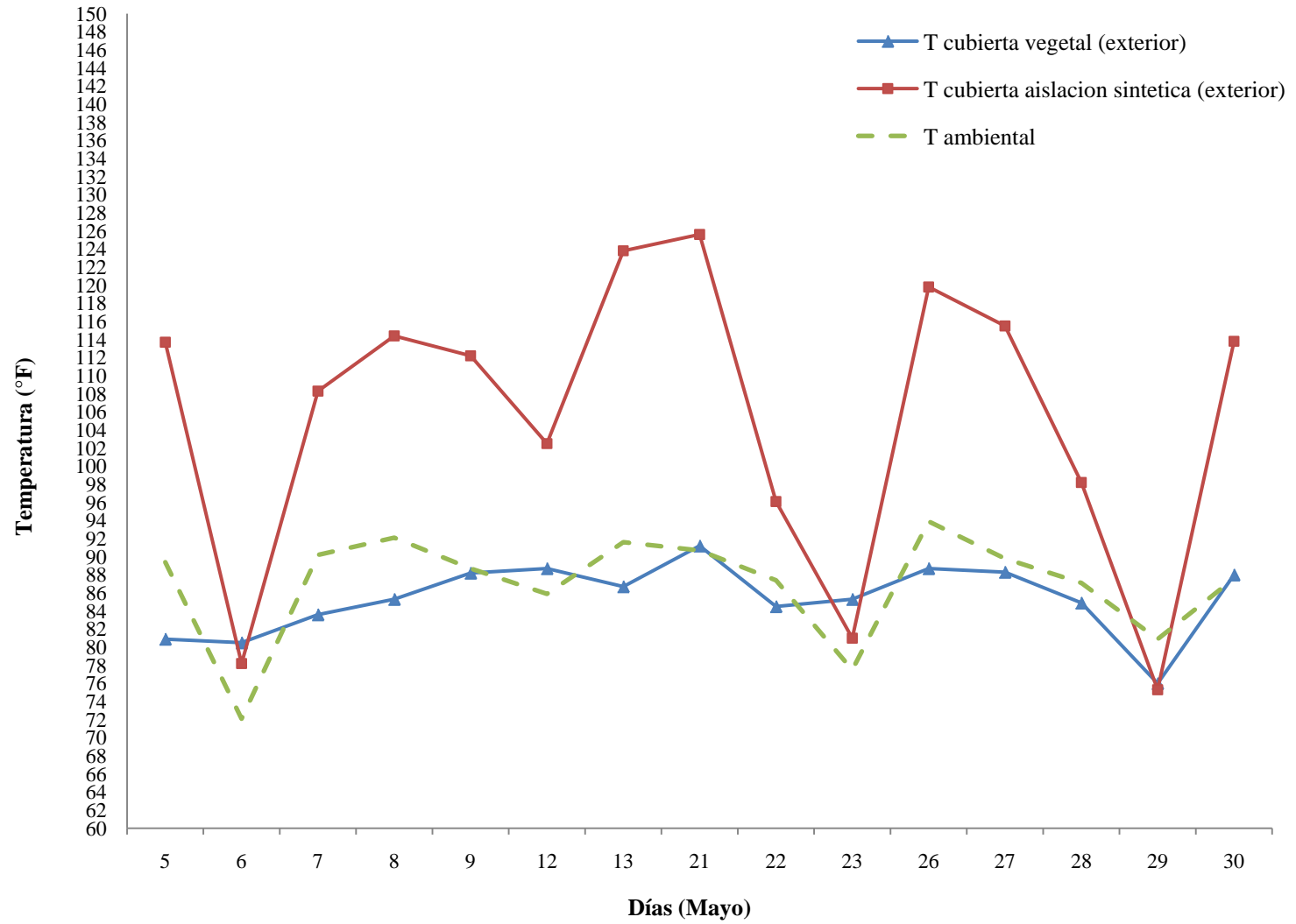


Figura 11. Comparación de temperaturas exteriores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante el mediodía para el mes de mayo. (n=15)

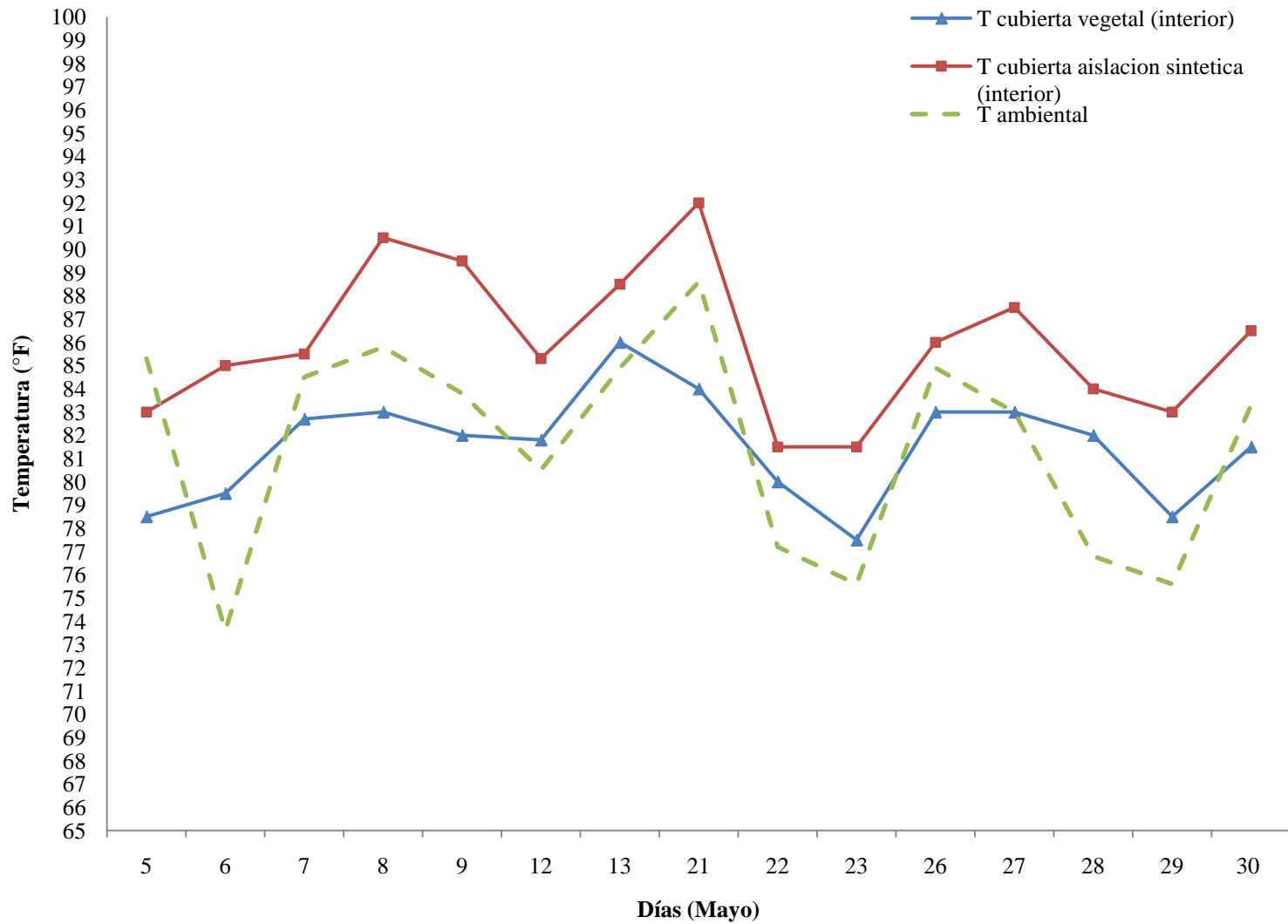


Figura 12. Comparación de temperaturas interiores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante la tarde para el mes de mayo. (n=15)

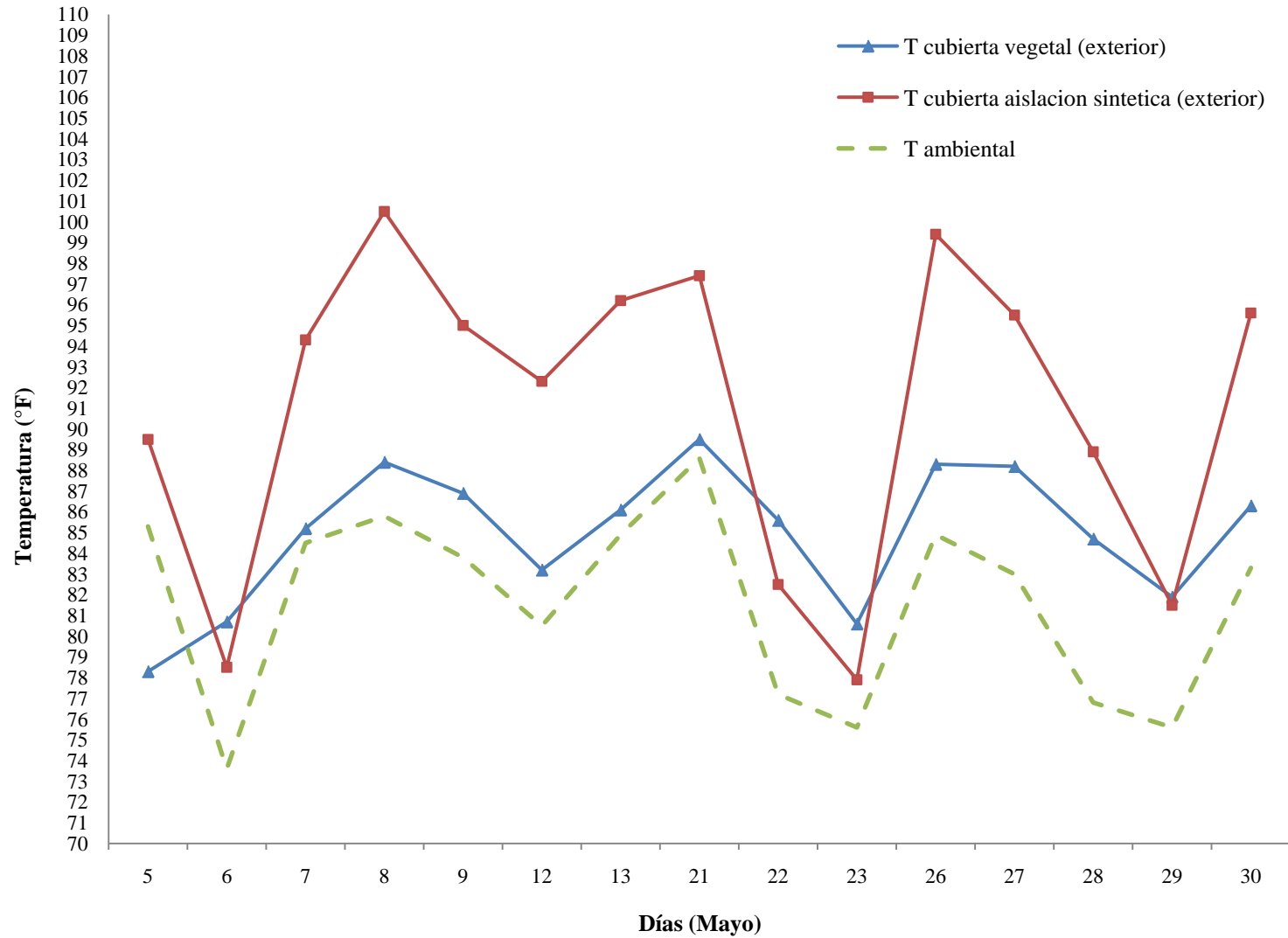


Figura 13. Comparación de temperaturas exteriores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante la tarde para el mes de mayo. (n=15)

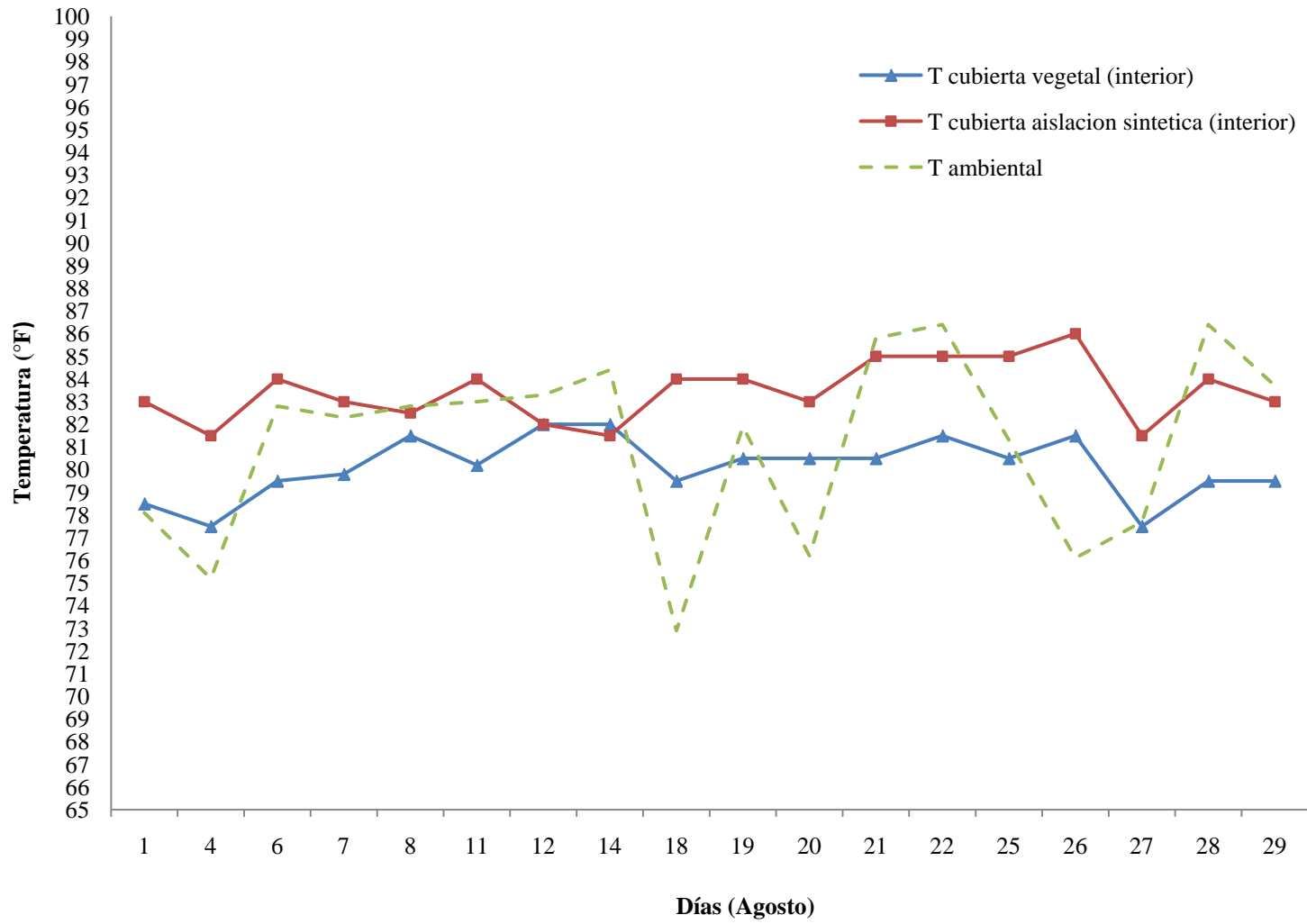


Figura 14. Comparación de temperaturas interiores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante en la mañana. (n=18)

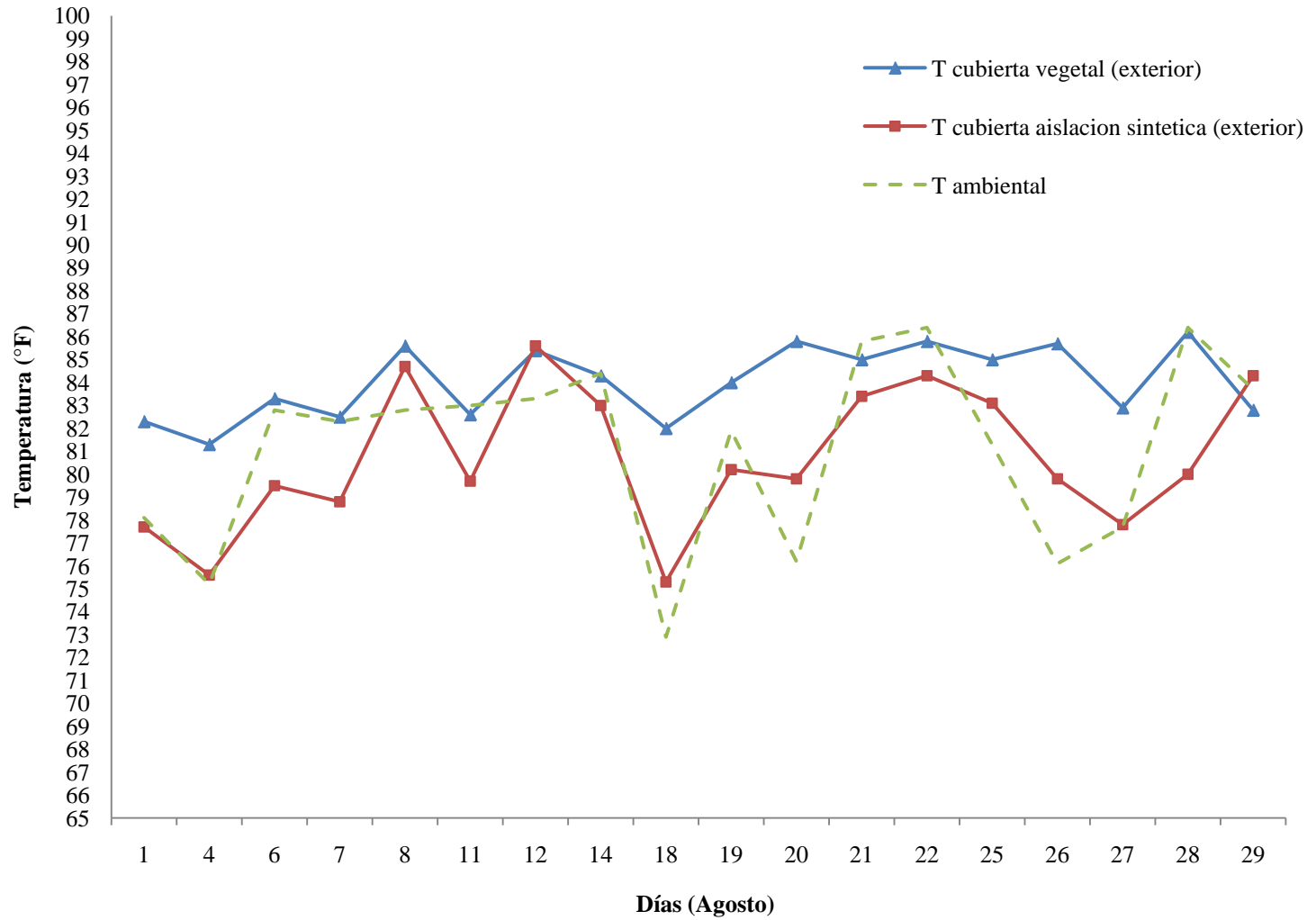


Figura 15. Comparación de temperaturas exteriores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante en la mañana. (n=18)

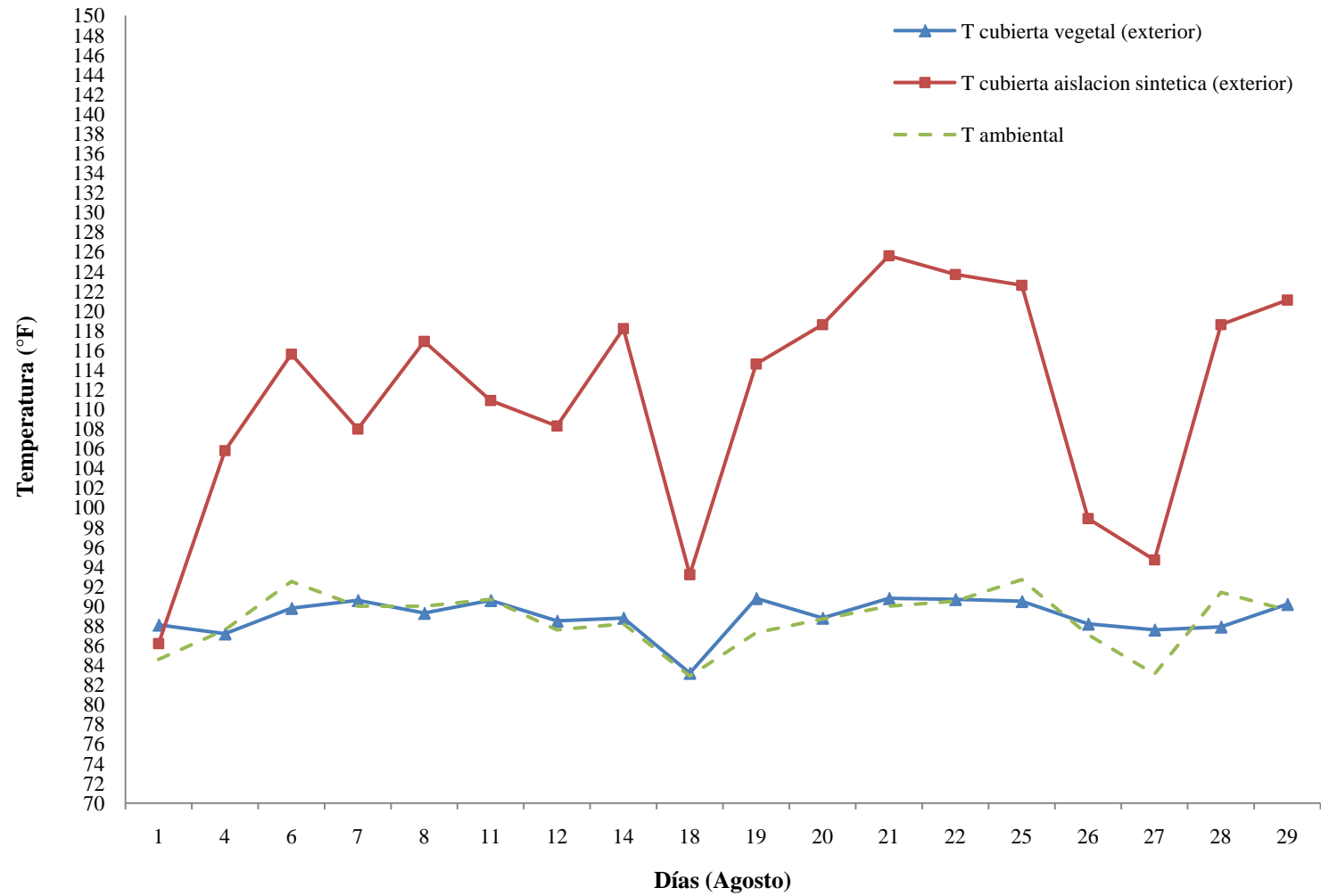


Figura 16. Comparación de temperaturas exteriores cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante en el mediodía para el mes de agosto. (n=18)



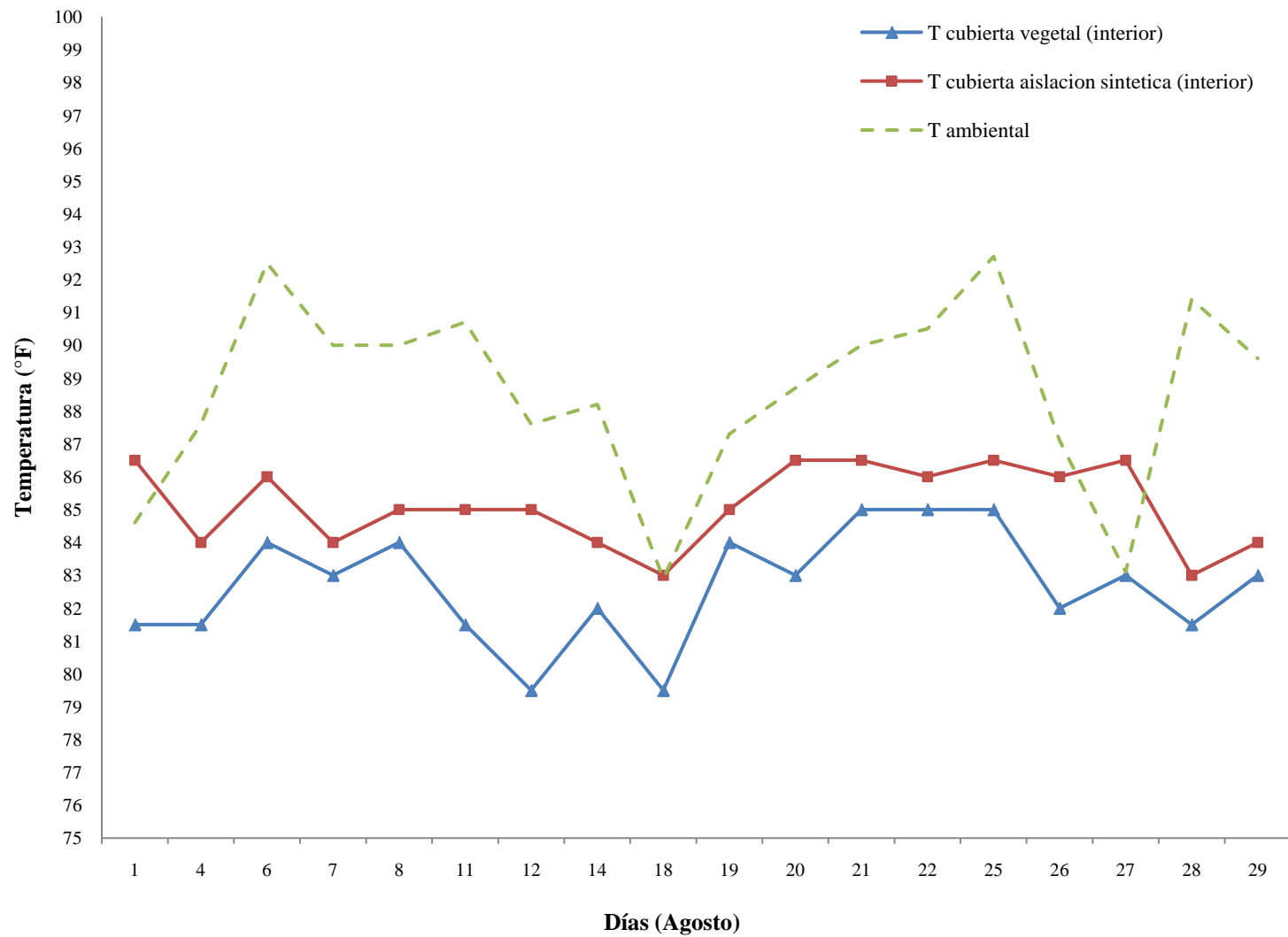


Figura 17. Comparación de temperaturas interiores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante en el mediodía para el mes de agosto. (n=18)

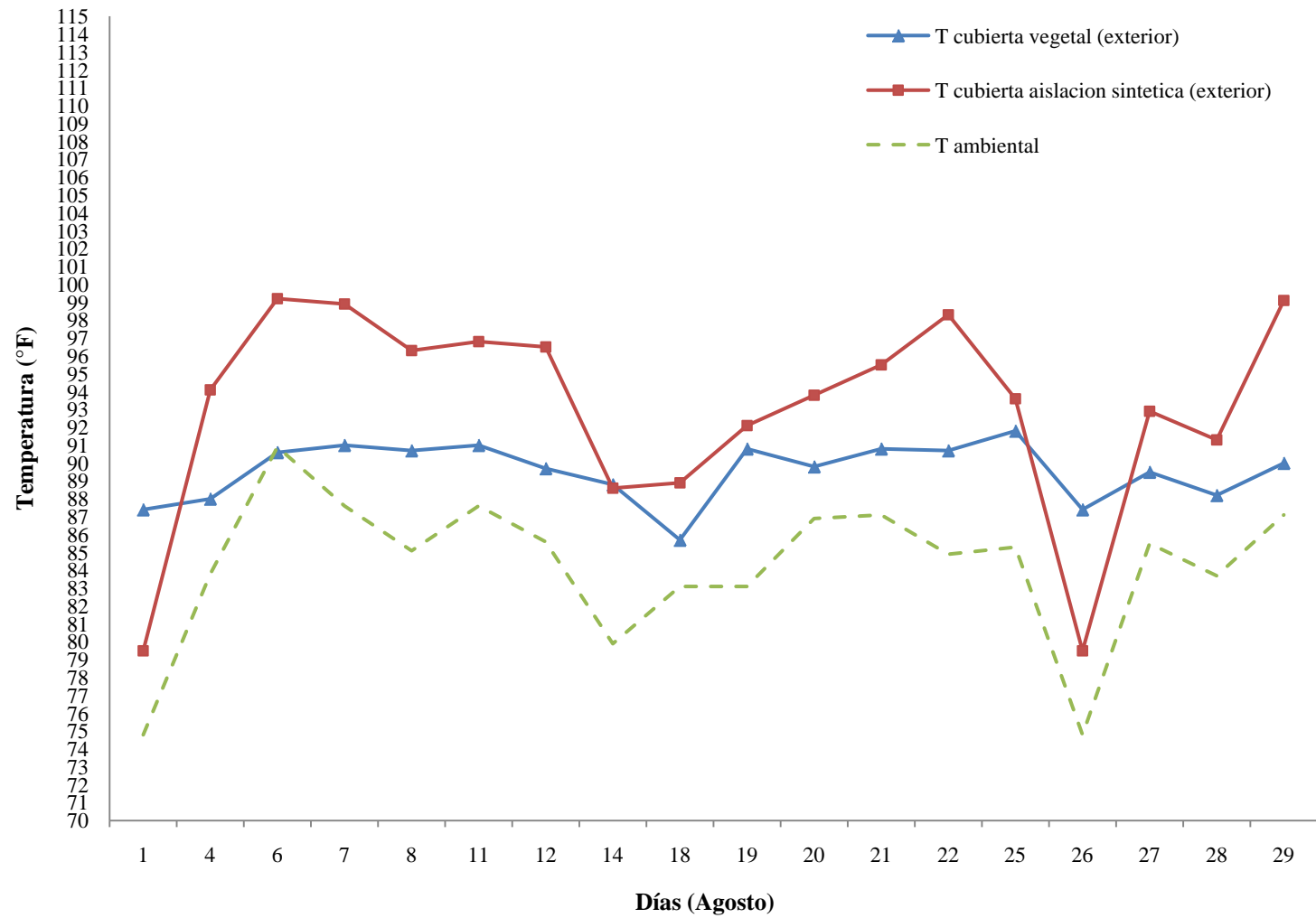


Figura 18. Comparación de temperaturas exteriores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante en la tarde para el mes de agosto. (n=18)

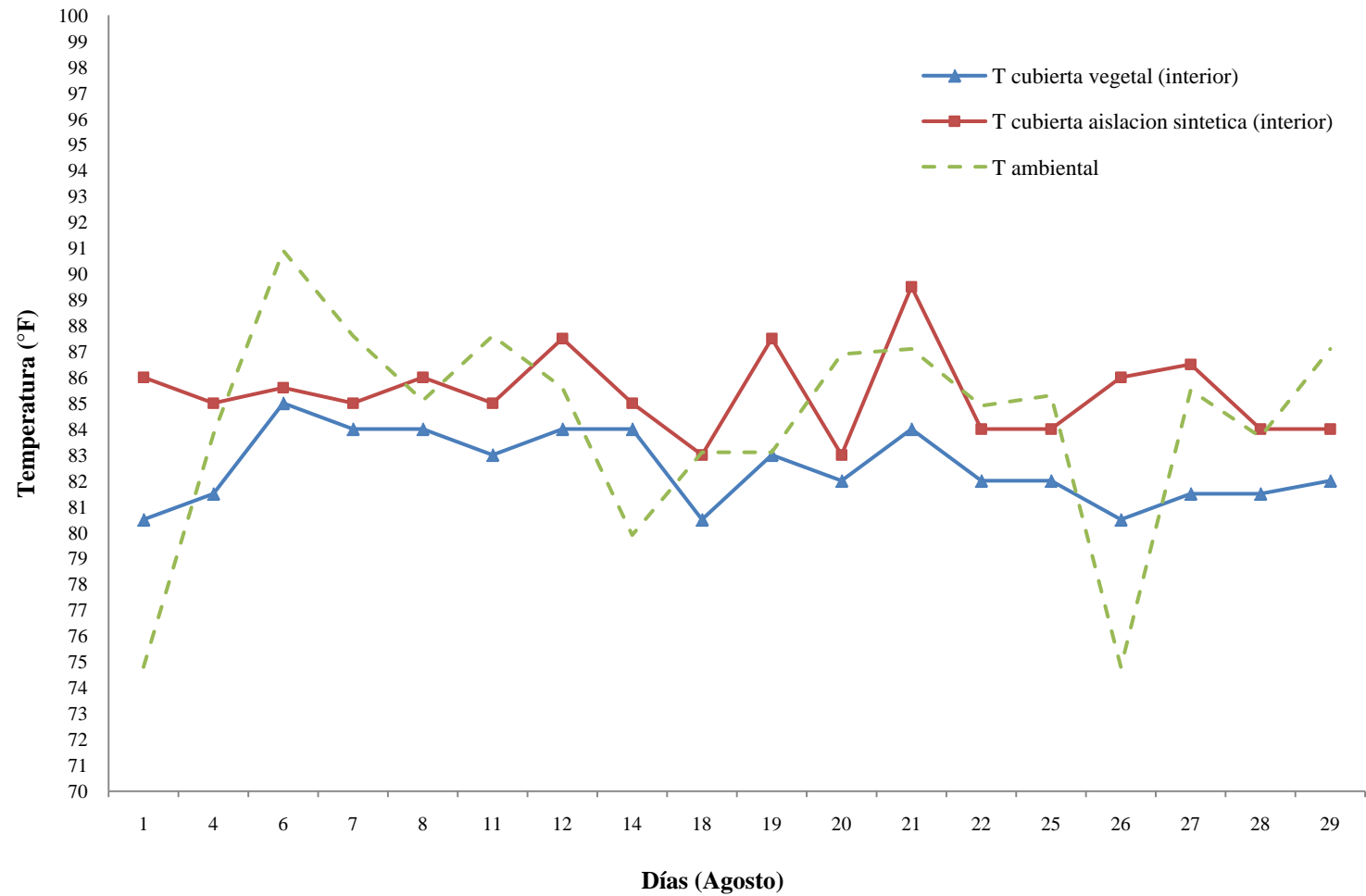


Figura 19. Comparación de temperaturas interiores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante en la tarde del mes de agosto. (n=18)

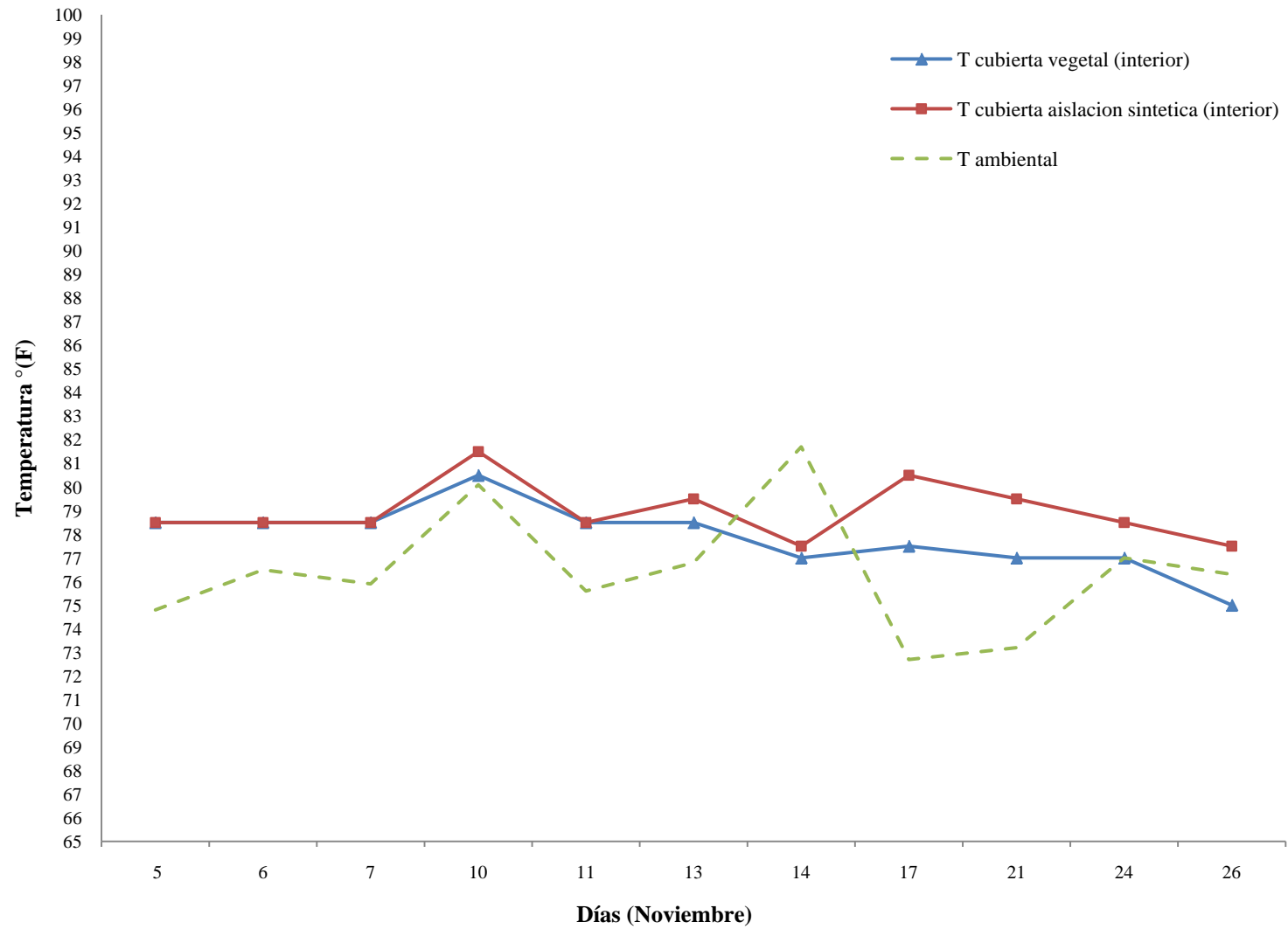


Figura 20. Comparación de temperaturas interiores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante la mañana para el mes de noviembre. (n=11)

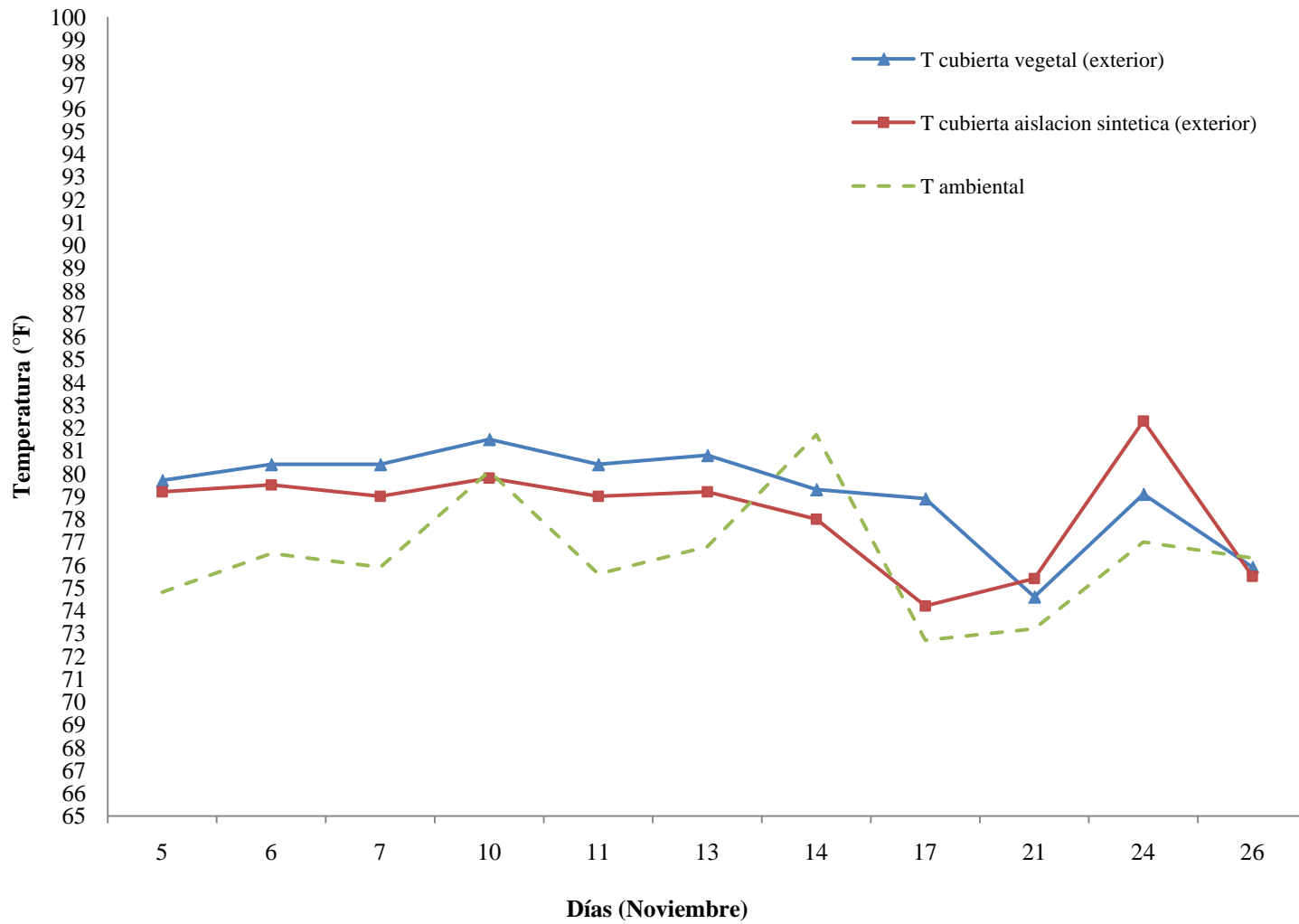


Figura 21. Comparación de temperaturas exteriores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante la mañana para el mes de noviembre. (n=11).

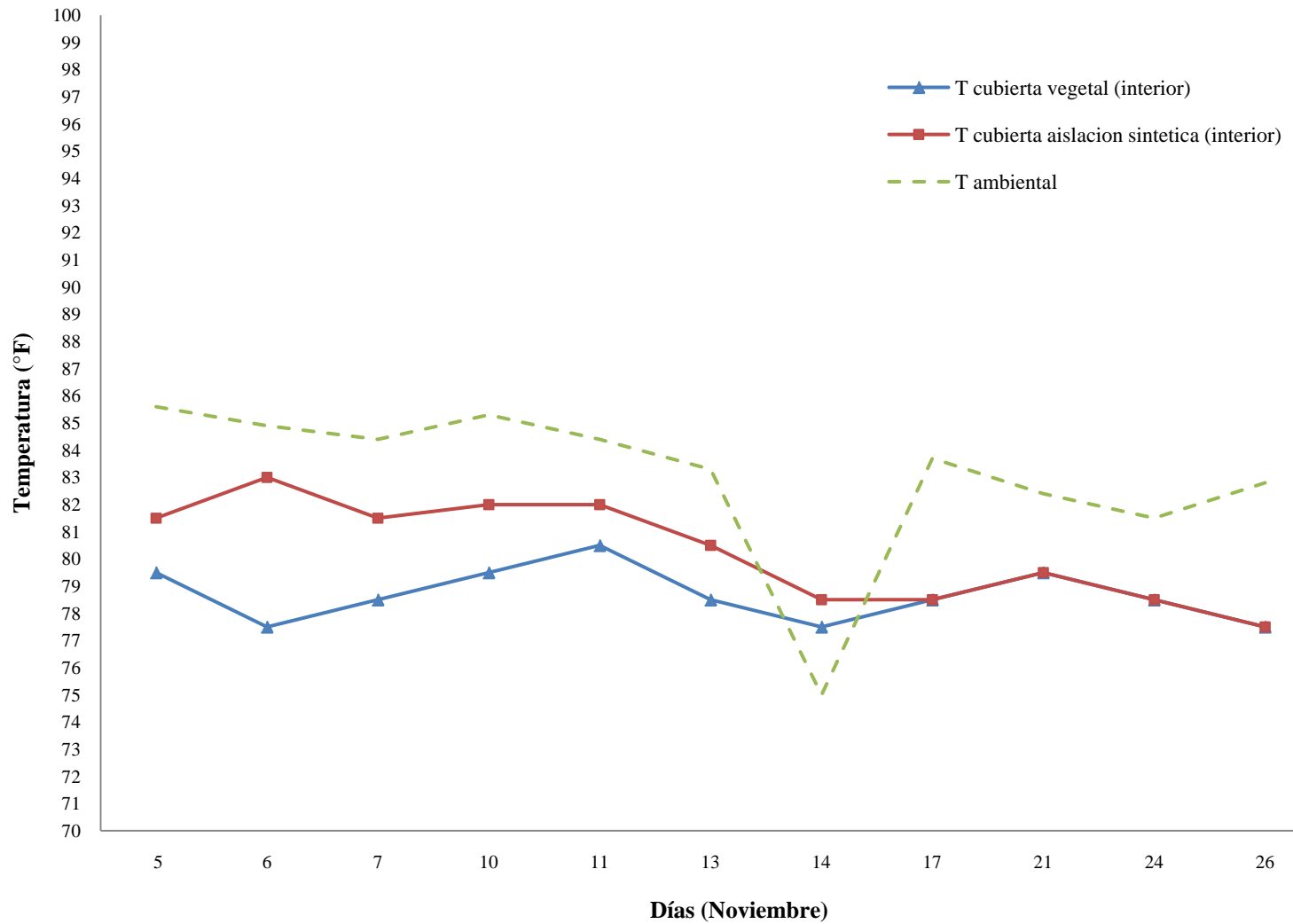


Figura 22. Comparación de temperaturas interiores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante el mediodía para el mes de noviembre. (n=11).

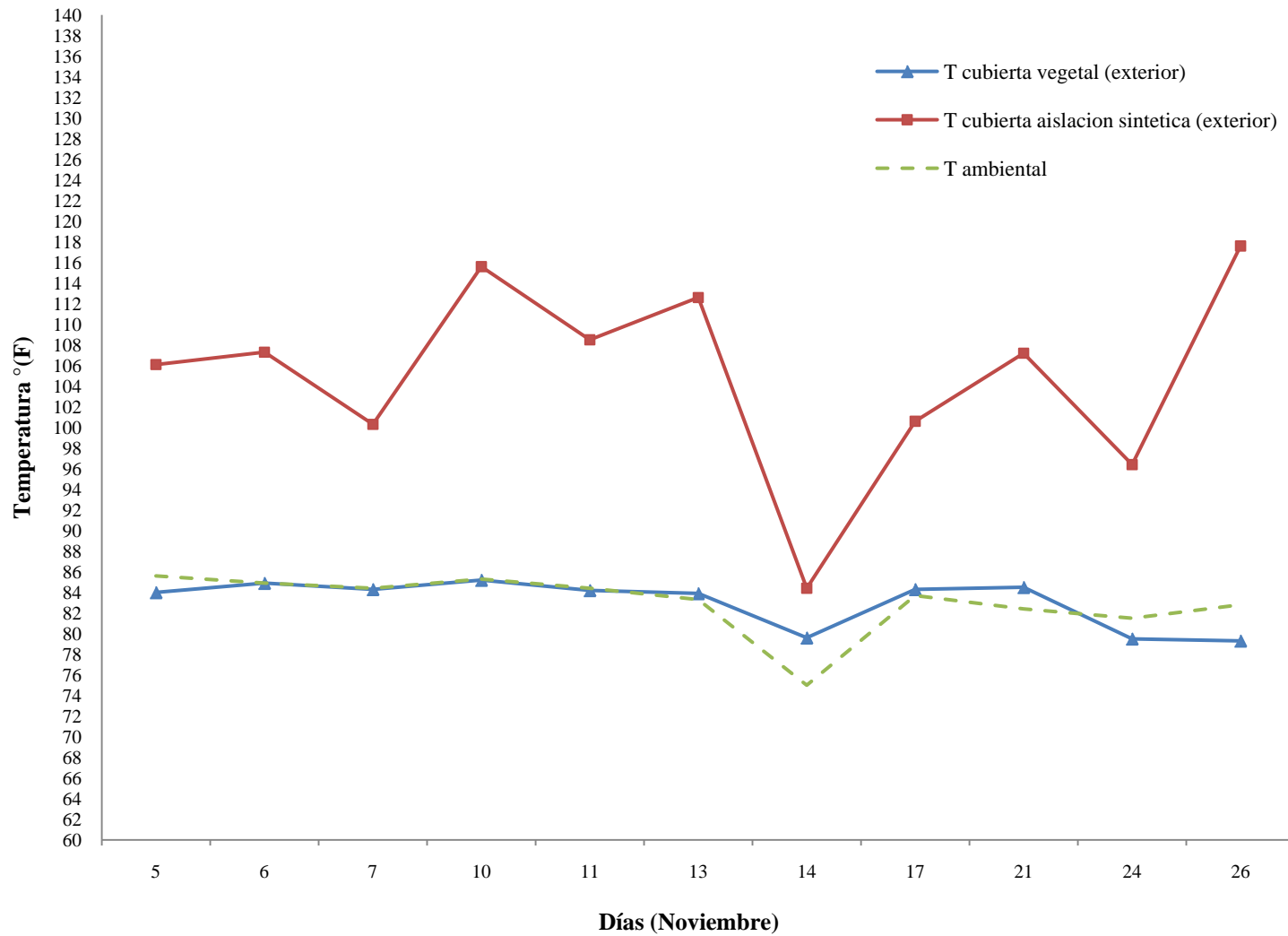


Figura 23. Comparación de temperaturas exteriores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante el mediodía para el mes de noviembre. (n=11)

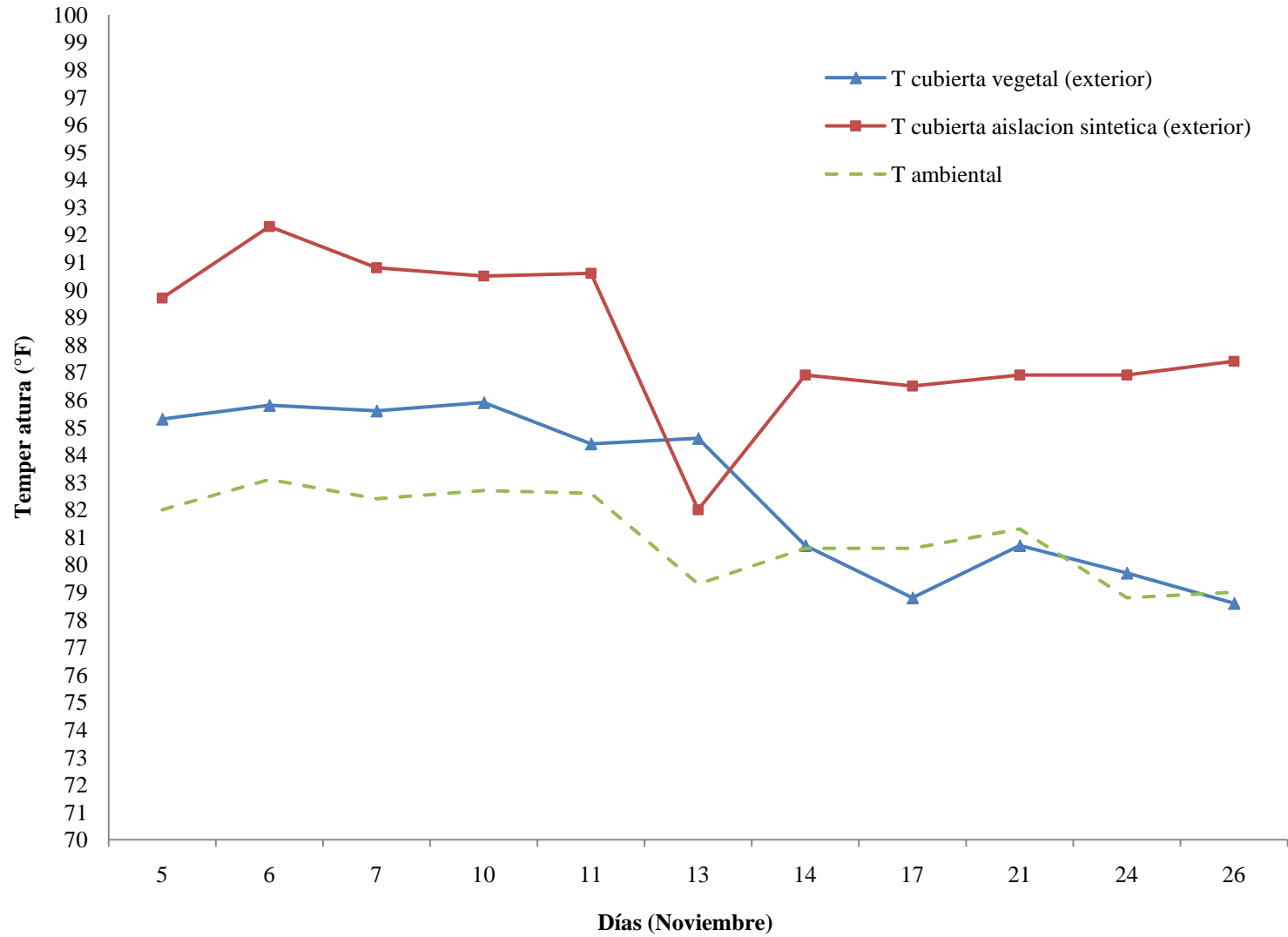


Figura 24. Comparación de temperaturas exteriores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante la tarde para el mes de noviembre. (n=11)



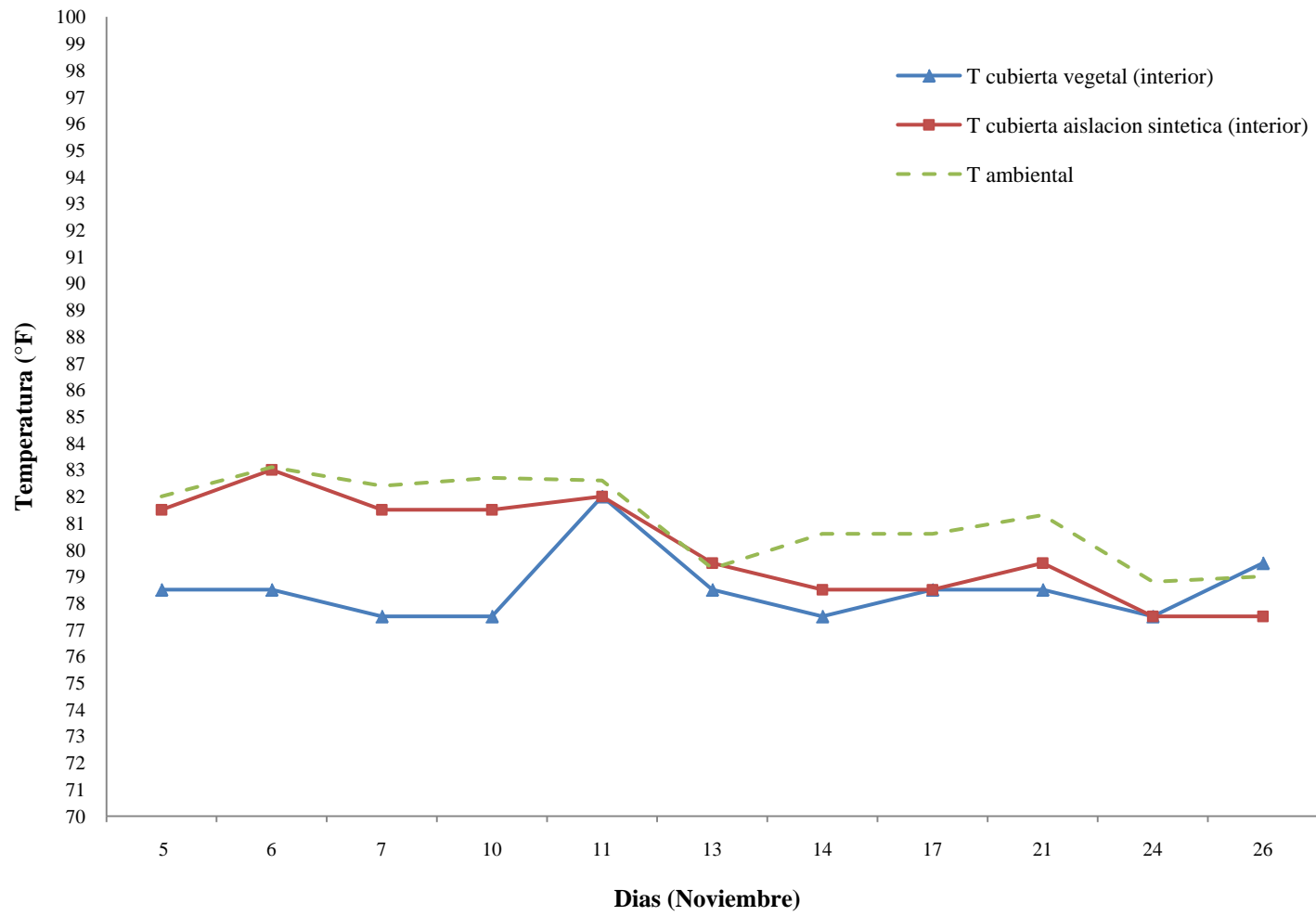


Figura 25. Comparación de temperaturas interiores entre cubierta vegetal y cubierta aislamiento sintética vs temperatura ambiental durante la tarde para el mes de noviembre. (n=11)

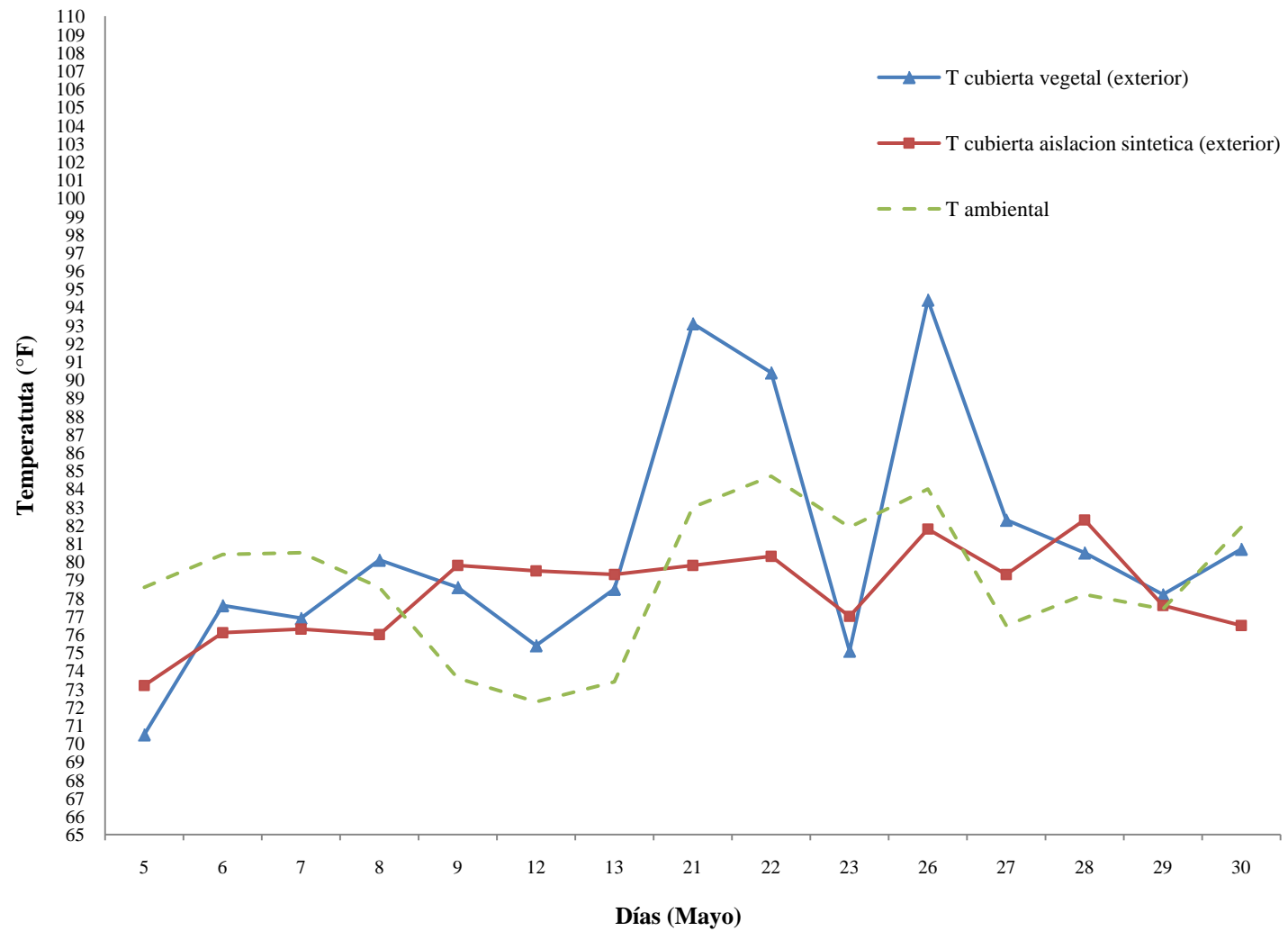


Figura 26. Comparación de temperaturas exteriores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante la mañana para el mes de marzo. (n=15)

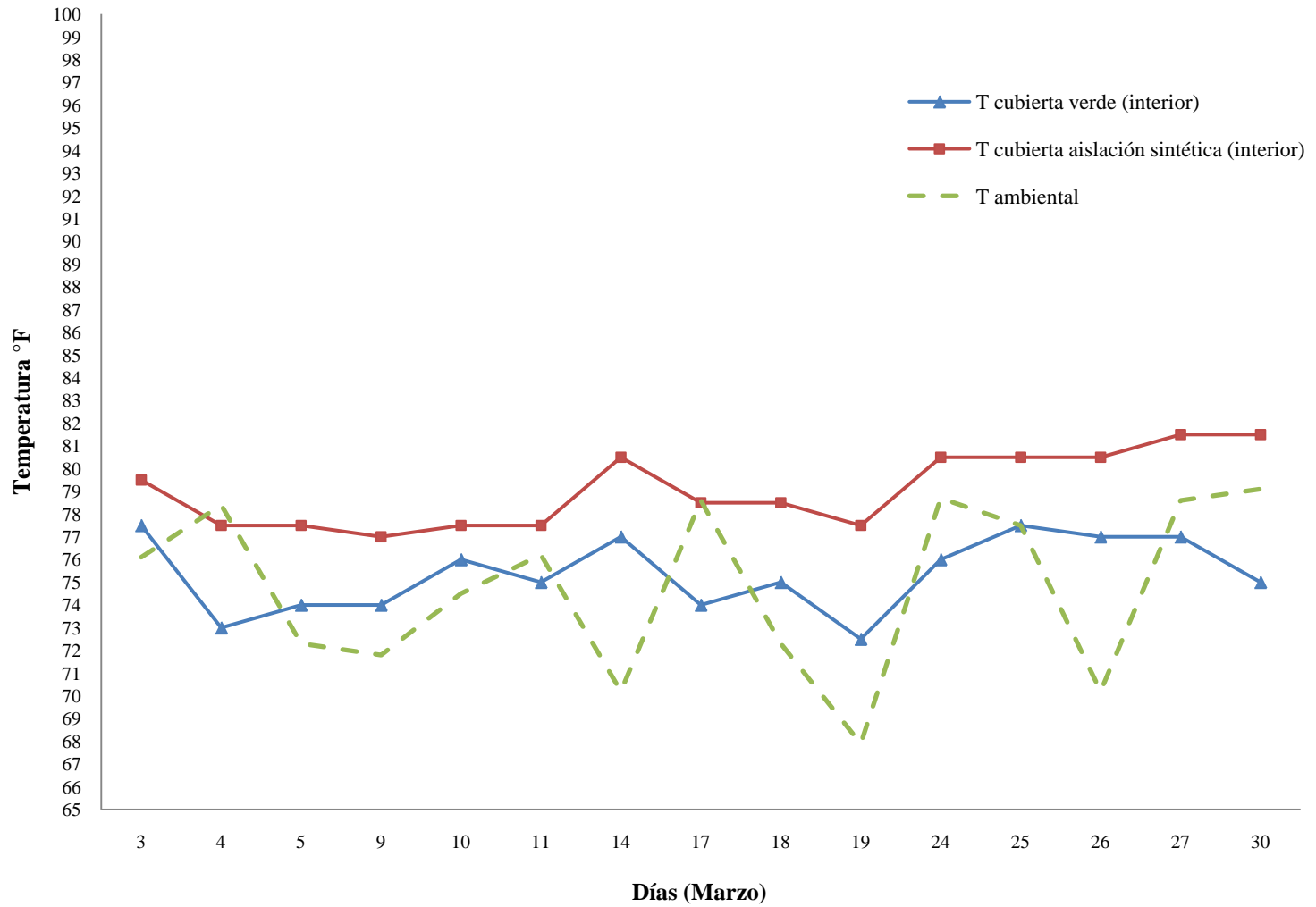


Figura 27. Comparación de temperaturas interiores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante la mañana para el mes de marzo. (n=15)

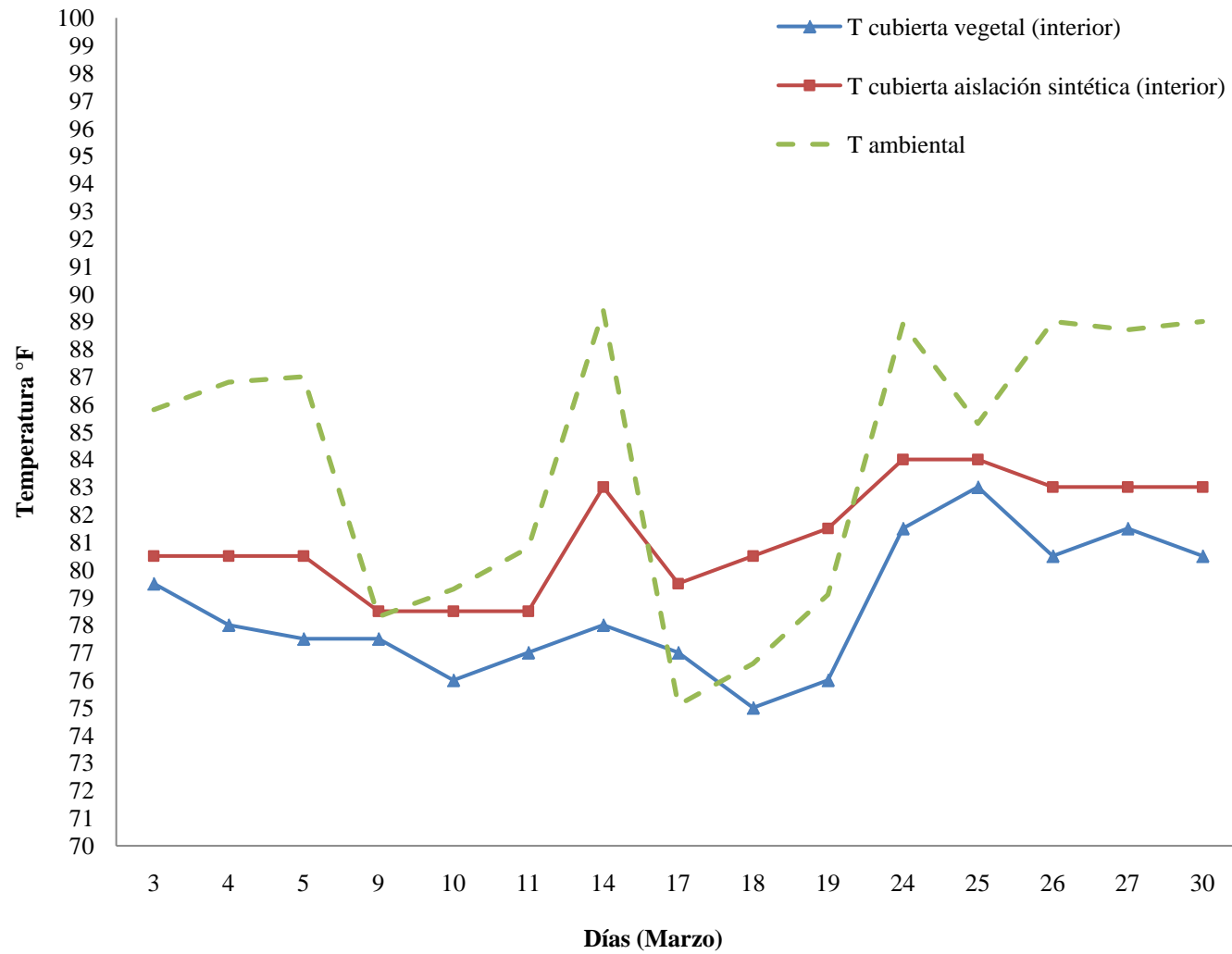


Figura 28. Comparación de temperaturas interiores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante el mediodía para el mes de marzo. (n=15)

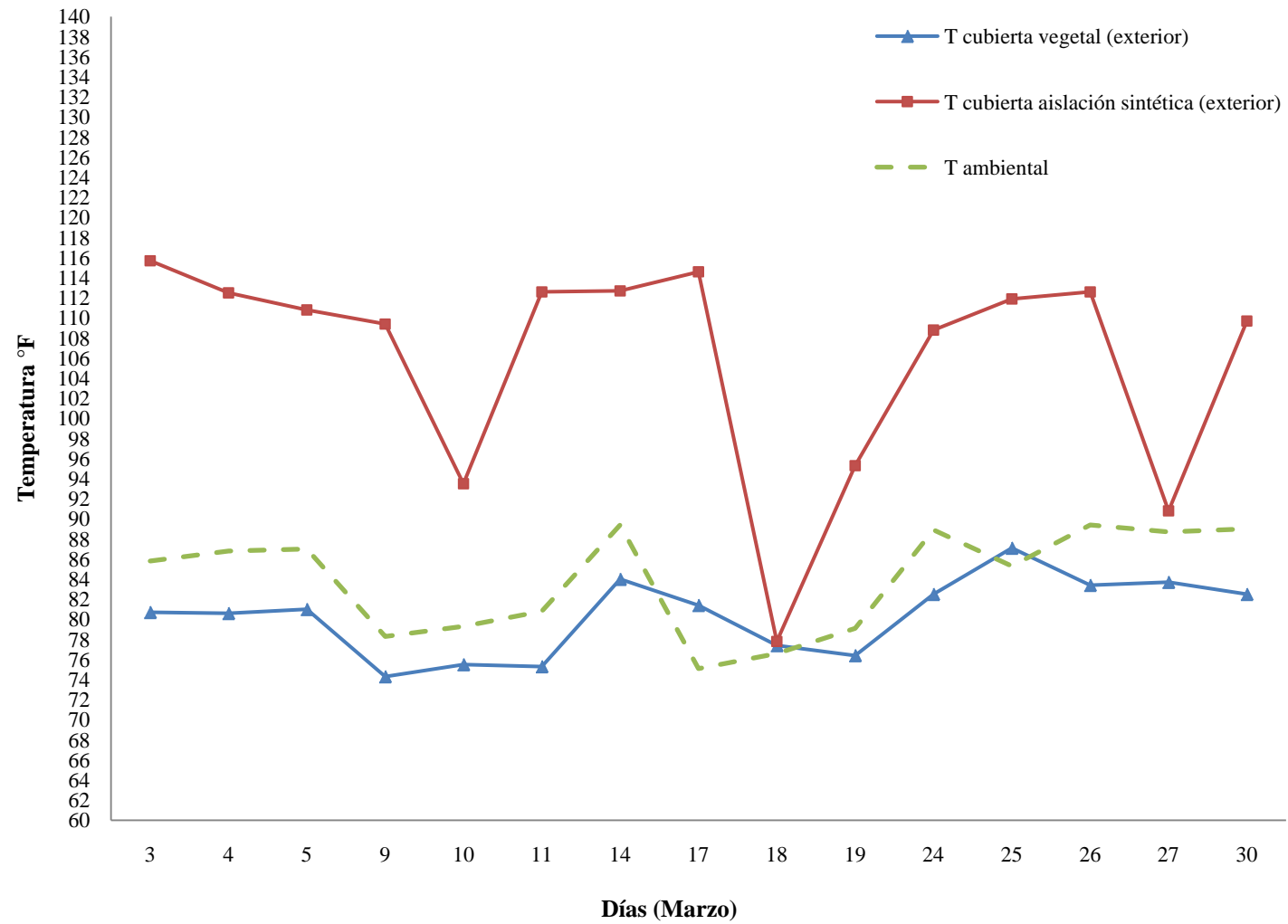


Figura 29. Comparación de temperaturas exteriores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante el mediodía para el mes de marzo. (n=15)

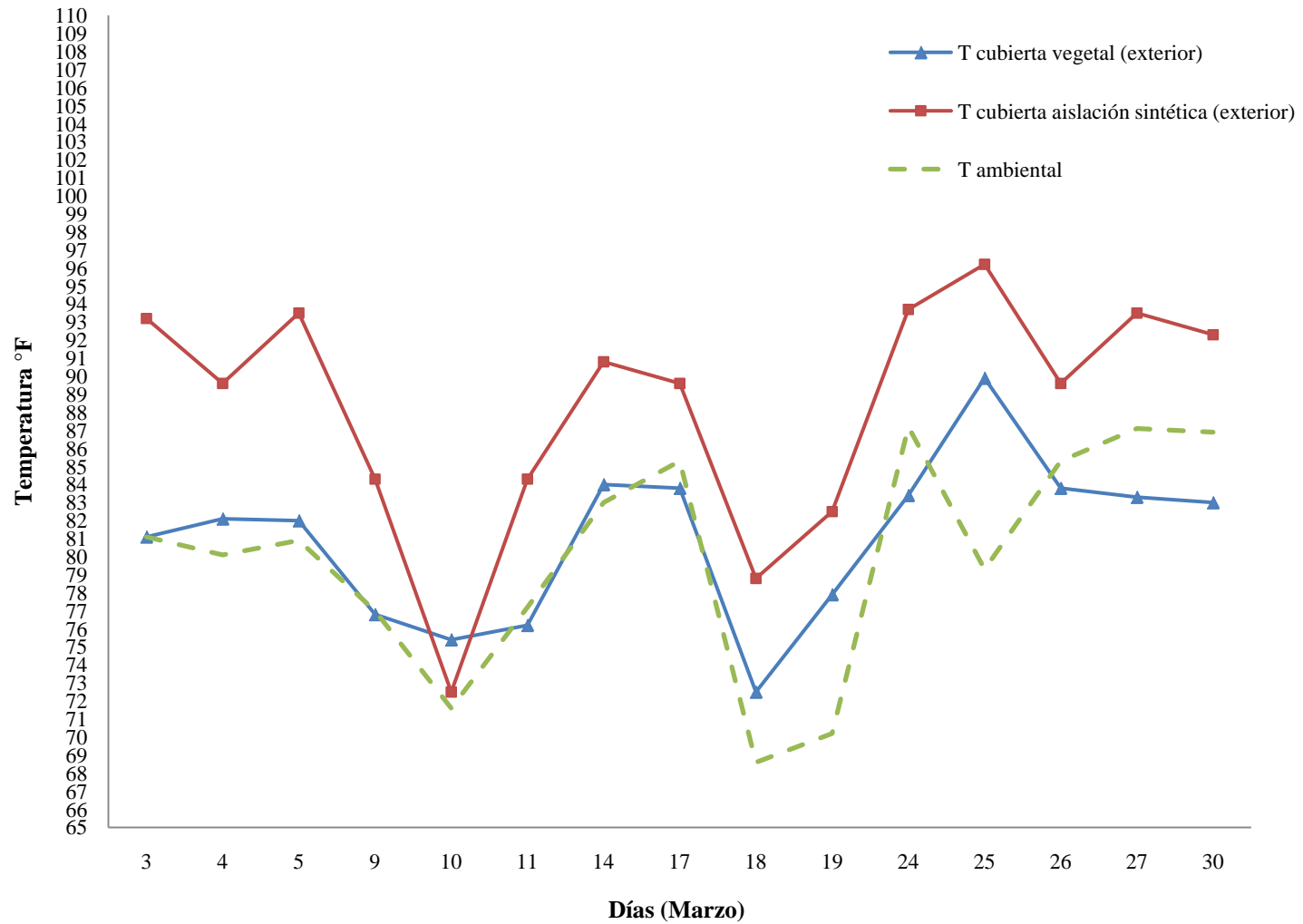


Figura 30. Comparación de temperaturas exteriores entre cubierta vegetal y cubierta aislación sintética vs temperatura ambiental durante la tarde para el mes de marzo. (n=15)

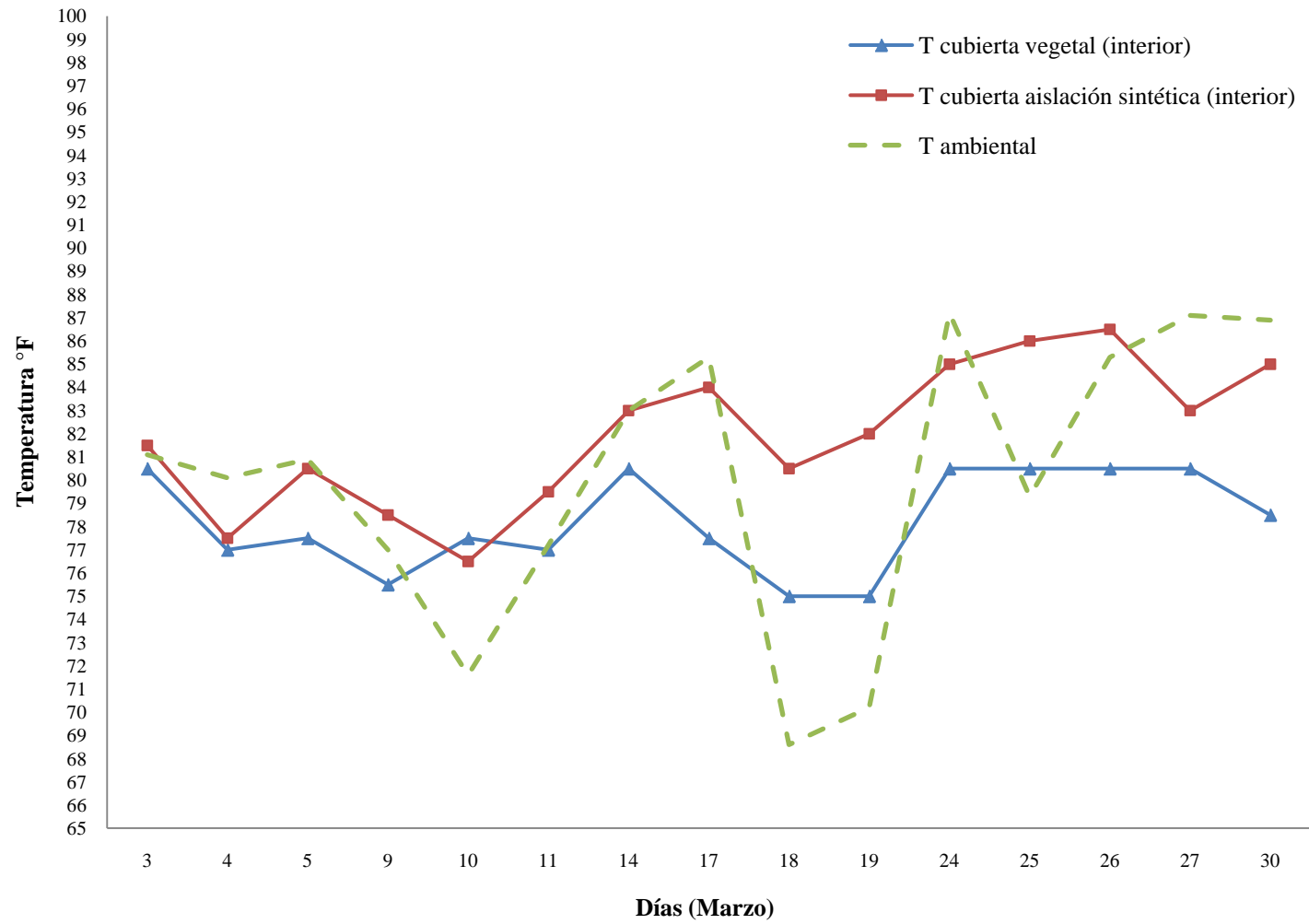


Figura 31. Comparación de temperaturas interiores entre cubierta vegetal y cubierta aislamiento sintética vs temperatura ambiental durante la tarde para el mes de marzo. (n=15)

**APÉNDICE**



**APÉNDICE 1: FOTOS DE LA CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA  
CON CUBIERTA VEGETAL**



Preparación de la superficie del techo para instalación del sistema.



Incorporación de la capa geotextil para proteger la superficie del techo de los daños causados durante la instalación del sistema con cubierta vegetal.



Instalación de las celdas de drenaje *Atlantic Drainage Cells* sobre la superficie del techo.



Se instalaron las celdas de drenaje como una cubierta continua sobre la superficie del techo.



Se añadió medio de crecimiento de peso liviano sobre la capa geotextil.



Sistema de riego y goteo e irrigación instalado en el sistema con cubierta vegetal.



Incorporación de las plantas seleccionadas para el sistema con cubierta vegetal.



Finalización de la instalación de la primera fase del sistema con cubierta vegetal.



Instalación de la segunda fase del sistema con cubierta vegetal.



Se añadió el medio de crecimiento con alto contenido orgánico y disponibilidad de nutrientes para las plantas.



Finalización en la instalación de la segunda fase del sistema con cubierta vegetal.



Establecimiento completo de la vegetación sobre el medio de crecimiento.