

Evaluación del desempeño de los techos verdes como aislantes térmicos para edificaciones

Erika Carolina Tovar Proaño

**Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Honduras**

Noviembre, 2018

ZAMORANO
CARRERA DE AMBIENTE Y DESARROLLO

Evaluación del desempeño de los techos verdes como aislantes térmicos para edificaciones

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar
al título de Ingeniera en Ambiente y Desarrollo en el
Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

Erika Carolina Tovar Proaño

Zamorano, Honduras
Noviembre, 2018

Evaluación del desempeño de techos verdes como aislantes térmicos para edificaciones

Erika Carolina Tovar Proaño

Resumen. En los últimos años la aplicación de techos verdes como medidas de adaptación y mitigación al cambio climático se ha incrementado gracias a los beneficios económicos y ambientales que brindan. Esta tecnología es un sistema multicapas utilizada como sustituto de espacios verdes en áreas urbanas. La colocación de estas capas permite reducir la transferencia de calor del exterior hacia el interior, mejorando la eficiencia energética en las construcciones. El presente estudio fue realizado en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Se evaluó la propiedad aislante térmica de los techos verdes en comparación con techos testigos y se determinó la correlación existente entre la temperatura ambiente y las unidades experimentales. Para ello se analizó los datos de 19 días con intervalos de 15 minutos. Los resultados mostraron que existe una influencia directa de la temperatura ambiental sobre la registrada en el interior de las unidades experimentales. Por otra parte, se encontró que existe diferencias significativas entre las temperaturas internas de las unidades testigo y las unidades dotadas de techos verdes, así también entre el *Arachis pintoi* y el *Ophiopongo japonicus* utilizados para cobertura vegetal. Se registró un gradiente promedio de 2.24 °C entre la unidad testigo y la temperatura ambiente, mientras que en las unidades con techos verdes presentó un gradiente promedio de 4.09 - 4.22 °C. Finalmente, se registraron menores temperaturas internas en las unidades con mayor espesor de cobertura vegetal.

Palabras clave: *Arachis pintoi*, eficiencia energética, gradiente térmico, *Ophiopongo japonicus*, transferencia de calor.

Abstract. In recent years the application of green roofs as adaptation and mitigation to climate change has increased thanks to the economic and environmental benefits they provide. This technology is a multilayer system used as substitutes for green spaces in urban areas. The implementation of these layers allows to reduce the heat transfer from the exterior to the interior, improving energy efficiency in buildings. This study was developed at the Zamorano Pan-American Agricultural School. The thermal insulating property of the green roofs were evaluated in comparison with the non-insulated roofs, and the correlation between the environmental temperature and the experimental units was determined. The results demonstrated that there are significant differences between the internal temperatures of the control units and the units with green roofs, and between the *Arachis pintoi* and the *Ophiopongo japonicus* used as vegetation layer. A gradient of 2.24 °C was recorded between the control unit and the ambient temperature, while green roofs' units recorded values within the range of 4.09 and 4.22 °C. Finally, there was a tendency to register a lower internal temperature in the units with greater thickness of vegetation layer.

Key words: *Arachis pintoi*, energy efficiency, heat transfer, *Ophiopongo japonicus*, thermal gradient.

CONTENIDO

Portadilla	i
Página de firmas.....	ii
Resumen.....	iii
Contenido	iv
Índice de Cuadros, Figuras y Anexo.....	v
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. METODOLOGÍA.....	5
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	11
4. CONCLUSIONES	18
5. RECOMENDACIONES	19
6. LITERATURA CITADA.....	20
7. ANEXO.....	23

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXO

Cuadros	Página
1. Correlaciones Rho de Spearman entre UE y temperatura ambiente (Diurno).	11
2. Correlaciones Rho de Spearman entre UE y temperatura ambiente (Nocturno)...	12
3. Análisis de comparación de medias de las unidades experimentales.....	12
4. Prueba post-hoc LSD Fisher (Diurno).....	13
Figuras	Página
1. Ubicación de las unidades experimentales en el departamento IAD.	5
2. Estructura de las unidades experimentales y sus dimensiones.....	6
3. Estructura de los techos verdes.....	7
4. Identificación de las unidades experimentales.	10
5. Comparación de tendencia de las temperaturas.....	13
6. Diferencia entre la temperatura ambiente y la unidad testigo.	14
7. Diferencia entre la temperatura ambiente y los techos verdes.	14
8. Comportamiento de las temperaturas durante el día (7:00 a.m. – 7:00 p.m.)	15
9. Diferencia numérica de gradiente entre las unidades M.F y M.G.	16
10. Unidad experimental M.G con <i>Eclipta Alba</i>	17
11. Unidad experimental M.F.....	17
Anexo	Página
1. Fuerza de las relaciones.....	23

1. INTRODUCCIÓN

La necesidad de reestablecer un balance ecosistémico en zonas interrumpidas por el crecimiento poblacional y su expansión inmobiliaria ha favorecido la adopción de techos verdes como una alternativa sostenible, que contribuye a la eficiencia energética en edificaciones (Joseph, 2015). En los últimos años la aplicación de techos verdes ha incrementado gracias a los beneficios económicos y ambientales que brindan (Gavilanes, 2015). Acorde a la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (2008) en el año 2005 se registró un incremento del 25% en instalaciones de techos verdes en comparación con años pasados.

Debido a esto, algunos países de Europa motivan la aplicación de esta tecnología a través de subsidios porcentuales. Así también, se han creado ordenanzas que obligan a las nuevas edificaciones tener al menos 100 m² de cubierta vegetal (Getter y Rowe, 2006). Por otra parte, aun cuando la aplicación de techos verdes inició en los años 70's en Alemania como medida de prevención contra fuego, actualmente son utilizados como medida de adaptación y mitigación al cambio climático (Oberndorfer et al., 2007). Además, contribuyen a la reducción de los impactos de variabilidad climática, como los efectos calor-isla y escorrentía de aguas lluvias, favoreciendo la eficiencia energética, calidad del aire y la biodiversidad en zonas urbanas (Rámirez y Bolaños, 2012).

Los techos verdes son sistemas multicapas utilizados como sustitutos de espacios verdes en áreas urbanas, los cuales permiten la propagación de vegetación a través de una superficie expuesta al ambiente. Se trata del recubrimiento total o parcial con vegetación en azoteas, techos o cubiertas de edificios, asegurando que la infraestructura donde se implementará soporte el peso de las capas y de la vegetación que será establecida (Ibañez, 2008).

Esta tecnología está formada por diferentes capas, entre ellas: el material vegetal, sustrato, la capa filtrante que facilita el drenaje, membrana impermeable (anti-raíz) y base de la estructura. Para el mejor desarrollo de los techos, las plantas deben ser nativas de la región, resistentes a sequías, de raíces cortas y adaptables. La membrana impermeable, puede ser de polietileno de alta densidad, fluidos impermeabilizantes, PVC, entre otras. La capa de drenaje debe contener materiales porosos permitiendo alcanzar el efecto de almacenaje deseado de 15 a 25% de humedad (Minke, 2004).

Los techos verdes poseen diferentes clasificaciones, acorde con Minke (2004), García, Morales y López (2010) pueden ser extensivos e intensivos, siendo intensivos aquellos que implican elevados costos de mantenimiento por su amplia variedad de vegetación que demanda de fertilización, podas y riego; los cuales pueden tener desde arbustos hasta árboles. Para ello se requiere que el grosor del sustrato sea mayor a 20 cm, a manera de

brindar el espacio necesario para el buen desarrollo de las raíces. La clasificación extensiva es aquella que requiere poco mantenimiento, vegetación de bajo porte y una capa de sustrato que varía entre 3 y 20 cm de profundidad.

Otra categoría considerada son los techos semi-intensivos, estos se ubican entre los techos extensivos e intensivos con un mantenimiento y costo moderado (Torres y Morillón, 2007). Adicionalmente, existe la clasificación ligada a la colocación de las capas, siendo estos indirectos o directos. Es indirecto cuando las capas son colocadas en recipientes y es directo cuando hay contacto con la base de la estructura cubriendo completamente el área. Así también, existe la clasificación según el diseño estructural, los cuales son: multicapa monolítica, multicapa elevada, monocapa, entre otros (Rhodes, 2012).

Finalmente, existe una clasificación basada en la funcionalidad de los techos subdividiéndolos en: techos recreacionales, ecológicos especializados y techos huertas. Cada uno con distintos enfoques que van desde la producción alimentaria, creación de zonas de descanso hasta belleza paisajística (Valbuena y Tibasosa, 2016). Los techos verdes tipo huerta contribuyen al incremento de la agricultura urbana. Esta tecnología representa un elemento importante en la categorización de edificios verdes, dado que es una tecnología congruente con los objetivos de eficiencia energética, adaptación y mitigación al cambio climático, entre otros (Villa, 2009).

La tecnología de techos verdes, tiene como finalidad amortiguar la transferencia de las cargas térmicas externas hacia el interior de las construcciones, es decir, reduce las fluctuaciones de temperatura. Estudios han demostrado que la eficiencia de esta tecnología varía de acuerdo con la temporada, dado que, los techos verdes presentan un mejor desempeño como aislante térmico frente a altas temperaturas. Es decir, ante bajas temperaturas no se logra un efecto de aislamiento térmico contribuyendo a la salida del calor (Desjarlais, Zaltash y Jerald, 2010).

Simmons, Gardiner y Windhager (2008) evaluaron el gradiente térmico de seis diferentes unidades experimentales: techos verdes, reflectivos y no reflectivos. El estudio se realizó en el estado de Texas el cual contaba con un clima subhúmedo y subtropical. Los resultados mostraron la reducción efectiva de temperatura en la cubierta de los techos verdes obteniendo temperaturas de 31 - 38 °C en comparación con los techos reflectivos y no reflectivos con 42 y 68 °C, respectivamente.

Ordóñez y Pérez (2015) estudiaron la aplicación de techos verdes para la reducción de gradientes de temperatura en edificaciones del estado de Yucatán. Para ello, se acondicionó las terrazas de dos salas audiovisuales, con una capa sustrato de 0.15 m para los techos verdes. El estudio encontró que el techo verde redujo las fluctuaciones temporales de temperaturas internas en comparación con el techo blanco, obteniendo fluctuaciones de 1.1 y 3.5 °C respectivamente. Sin embargo, al final del periodo de estudio se observó que el techo blanco se había degradado de forma natural por su exposición al ambiente, generando algunos contrastes en los gradientes de temperatura.

Por otra parte, un estudio realizado en tres viviendas rurales tropicales dotadas con cobertura vegetal y una como testigo en México, reportó una disminución de 4.5 °C en las habitaciones que tenían techos verdes. Todas las viviendas tenían dimensiones similares y el diseño se encontraba dentro de la clasificación extensivo – indirecto, dado que los cultivos fueron colocados en bandejas (Beltrán, Vargas, Pérez y García, 2014).

En el año 2005 se realizó una comparación de rendimiento térmico entre sistemas de techos verdes. El primer sistema identificado como “G”, compuesto de drenaje polimérico filtrante y anti-raíz, con sustrato de 10 cm de grosor, y el segundo sistema identificado como “S”, compuesto de paneles de drenaje de poliestireno expandido y tejido de filtro geotextil con sustrato de 7 cm. Los resultados encontrados denotan que el sistema “G”, al tener un mayor grosor, presentó una efectividad en la reducción de carga térmica de alrededor de 3% más que el sistema “S” durante el verano. Por otra parte, el sistema “S” fue 10% más efectivo en la reducción de pérdida térmica durante el invierno, lo cual se atribuyó a la capacidad extra de aislamiento de sus componentes de drenaje (Liu y Minor, 2005).

El consumo energético de dispositivos para regular temperatura, como la calefacción y el aire acondicionado, es proporcional a la carga térmica que se requiere añadir o retirar para estabilizar la temperatura en el interior de edificaciones (Mastronardi, Sfeir y Sánchez, 2016). Por lo tanto, al incrementar la variabilidad en la temperatura interna, mayor será el consumo energético de los dispositivos reguladores. Siendo este el punto de partida del enfoque de los techos verdes en eficiencia energética. Getter y Rowe (2006) indican que la reducción de 0.5 °C en la temperatura interna, puede llegar a disminuir hasta el 8% del consumo energético en una habitación con sistema de enfriamiento.

La guía de azoteas vivas y cubiertas verdes de Barcelona, indica que el impacto de los techos verdes dependerá de la vegetación y del uso que se le otorgue. Así también, las especies de plantas varían de acuerdo con el tipo de techo verde, entre ellas podemos encontrar: pastos, hierbas silvestres, árboles ornamentales, plantas herbáceas, comestibles, entre otras (Contreras y Castillo, 2015). Minke (2004) señaló que para obtener eficiencia en la aislación térmica se debe elegir vegetación con mayor densidad. Jim y Peng (2012) evaluaron la eficiencia de techos verdes usando *Arachis pintoi*, dado que cumple con las características necesarias para ubicarse en la clasificación extensiva, encontrando resultados positivos en la reducción de temperaturas internas.

La vegetación comúnmente utilizada para techos extensivos como medio de cobertura es *Sedum* spp, este género consiste en plantas suculentas de bajo porte y hábito rastrero; además poseen una alta tolerancia a elevadas temperaturas, resistencia a inundaciones, sequías y enfermedades. No obstante, como recomendación se sugiere que las plantas sean nativas de la región para asegurar la rápida adaptación, siempre que se mantenga el buen cuidado durante sus primeras semanas de establecimiento.

La importancia del presente estudio radica en explorar escenarios innovadores, mediante la evaluación de los techos verdes como tecnología sostenible con enfoque en eficiencia energética. La implementación de techos verdes contribuirá con la transformación de la EAP, Zamorano a una universidad verde, cumpliendo así con el apartado del plan estratégico 2017 – 2021. Además, de contribuir en el Ranking Mundial de Universidades

Ambientales, el cual evalúa de forma positiva la implementación de tecnologías ecológicas (GreenMetric, 2010; Universidad Zamorano, 2017). Adicionalmente, favorece en la toma de decisiones en proyectos regionales que buscan tecnologías sostenibles que le permitan crear sinergias entre la protección ambiental y el desarrollo social (Villa, 2009).

Los objetivos del estudio fueron:

- Determinar la correlación entre la temperatura interna alcanzada en las unidades experimentales y la temperatura ambiental.
- Evaluar la propiedad aislante térmica en unidades experimentales dotadas de techos verdes operadas a condiciones climáticas no controladas, a partir del registro de las temperaturas internas alcanzadas.
- Comparar el desempeño de dos cultivos utilizados como capa de cobertura vegetal mediante el gradiente térmico registrado en unidades experimentales.

2. METODOLOGÍA

Sitio de estudio.

El presente estudio se desarrolló en las instalaciones de la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Las unidades experimentales fueron instaladas detrás del edificio académico del Departamento de Ambiente y Desarrollo. La inclinación de los techos fue orientada hacia el sur para una mayor exposición a la irradiancia, reduciendo así la alteración de los datos en cuanto a la concurrencia de sombra. A continuación, se muestra el mapa con la ubicación de las unidades experimentales.

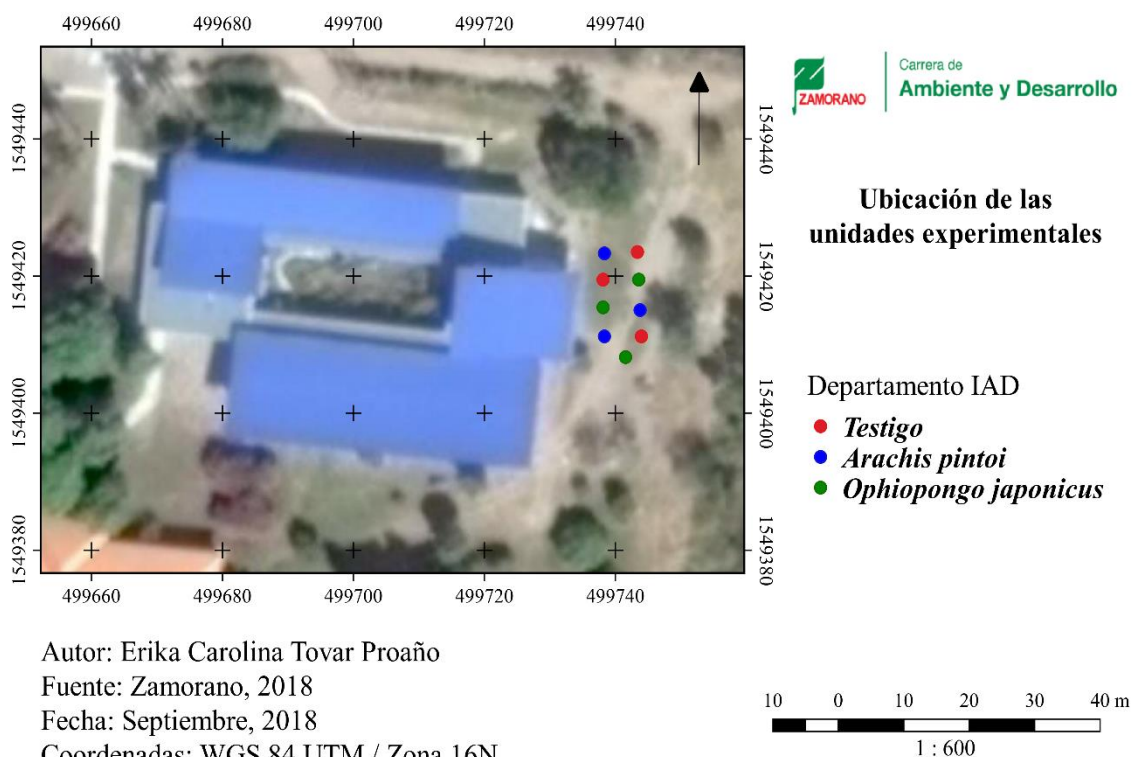


Figura 1. Ubicación de las unidades experimentales en el departamento IAD.

Unidades experimentales.

Para el desarrollo de esta investigación se realizó la construcción de unidades experimentales pilotos (UE) con dimensiones internas de $0.5 \times 0.5 \times 0.5$ m, con base y paredes de madera, sin aberturas que favorezcan la ventilación interna. El techo de la UE

se construyó con una pendiente del 20%, simulando las pendientes comúnmente usadas en construcciones, para ello se utilizó láminas de Aluzinc de 3×6 pulgadas. Se adaptó un borde alrededor del techo para la implementación de las capas y el establecimiento de la vegetación seleccionada. Para la construcción del borde se utilizó lámina lisa de zinc de 0.17 m de altura $\times$ 2 m de perímetro. La Figura 2 muestra la estructura que llevaron las UE de los techos verdes. La unidad testigo mantuvo la misma estructura con la excepción del borde superior.

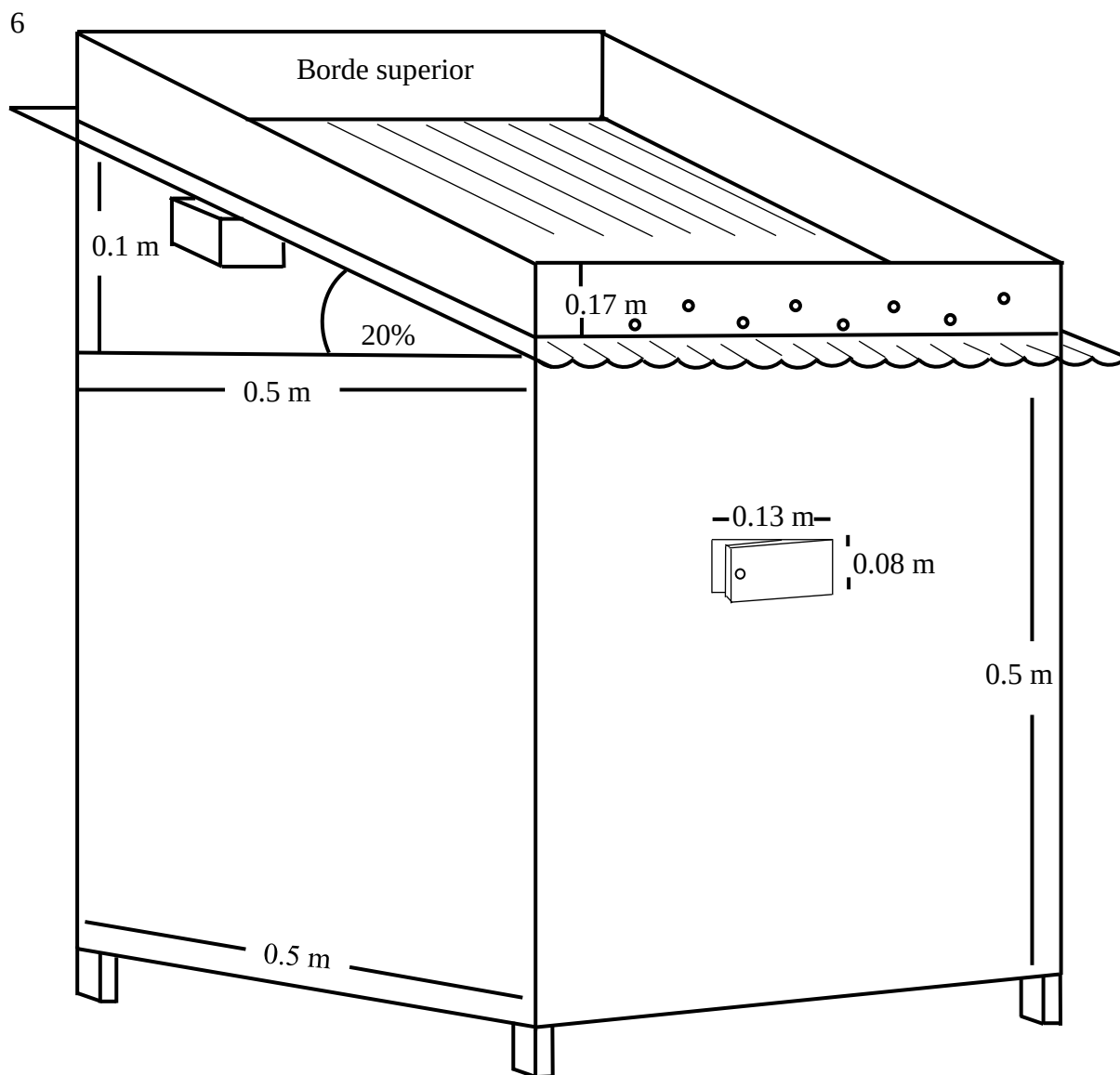


Figura 2. Estructura de las unidades experimentales y sus dimensiones.
Fuente: Elaboración propia

Los techos verdes fueron constituidos por: una capa de plástico de polietileno de alta densidad (PEAD), la cual evitaba el paso del agua hacia la lámina de Aluzinc; poliestireno expandido usado como medio poroso para el escurrimiento del agua y membranas filtrantes

de malla sarán que evitaban la saturación del sustrato, la capa de sustrato que fue de 0.10 m. La cobertura vegetal seleccionada fue: *Arachis pintoi* y *Ophiopongo japonicus*. A continuación, en la Figura 3 se muestra la estructura de las capas con sus respectivo orden y componentes.

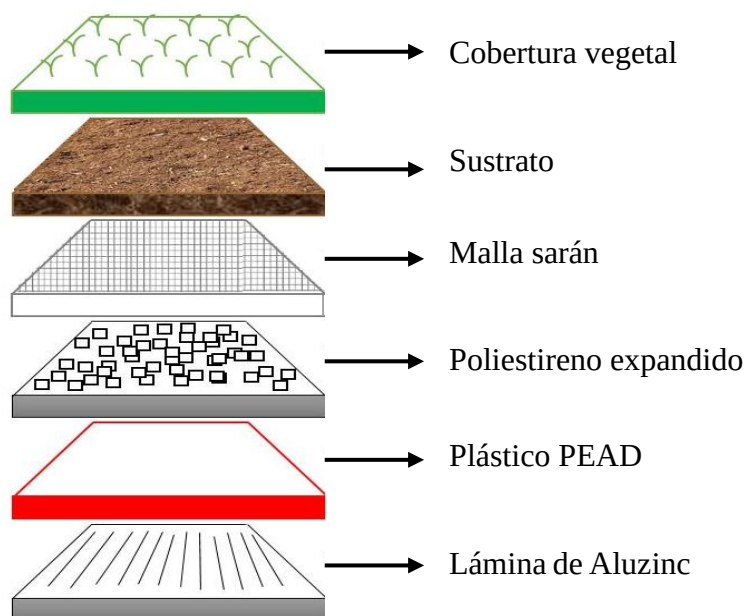


Figura 3. Estructura de los techos verdes.
Fuente: (Barba, 2014), adaptado por el autor.

Para el estudio se construyó un total de nueve UE, contando con tres repeticiones por cada tipo de techo, todas con las mismas dimensiones, diseño estructural y materiales, siendo el material vegetal establecido la única variante de los techos verdes. Su elaboración estuvo a cargo de la Unidad de Forestales de Zamorano

Establecimiento de los cultivos. Los techos verdes fueron establecidos con: *Arachis pintoi* y *Ophiopongo japonicus*. Cumpliendo con las especificaciones de techos extensivos en cuanto al medio de cobertura, ambos cultivos fueron seleccionados por las siguientes características: rápida adaptación, tolerancia media a sequías, a inundaciones, a elevadas temperaturas y de poco mantenimiento. La colocación de los cultivos se realizó una vez acondicionadas las nueve unidades experimentales.

El maní forrajero (*Arachis pintoi*) es una leguminosa herbácea y perenne, con crecimiento rastrero. Rincón, Cuesta, Pérez, Lascano y Ferguson (1992) sugieren que para tener un buen establecimiento es necesario que este sea sembrado en temporada de lluvias, utilizando suelos francos o franco arcillosos. Es adaptable a suelos pobres en nutrientes (K, P, Mg y Ca) y a suelos ácidos. La cobertura vegetal fue obtenida del área de jardines de la EAP, Zamorano. El cultivo se extrajo en forma de tepes, y algunos con pilones de suelos (los cuales variaban entre ellos), a manera de reducir el estrés por trasplante y por ende conseguir una rápida adaptación.

Dado que, el cultivo fue extraído de una zona donde prevalecía la presencia de sombra se otorgó una semana de adaptación a la luz solar. Por lo tanto, su trasplante fue realizado bajo sombra. Así también, para evitar el contacto de este con las horas de sol más fuertes, las UE fueron colocadas debajo de los árboles del jardín principal, logrando así, que el cultivo recibiera contacto directo con la luz solar en horas de la mañana, y en la tarde este contacto era interferido por la sombra de los árboles.

El mundo grass (*Ophiopongo japonicus*) es considerado una planta rústica y perenne, originaria del Este de Asia, puede tener entre 0.20 y 0.30 m de altura, es resistente a temperaturas extremas de -6 a 32 °C y se desarrolla en suelos arenosos o francos. Puede sobrevivir en medios acuosos, necesita de dos a tres riegos por semanas y sus requerimientos de fertilización básicos son: nitrógeno, fósforo y potasio (Pérez, 2013). Este material vegetal fue obtenido del módulo de Propagación de Plantas de la EAP, Zamorano. Para su establecimiento en las UE, se extrajo el cultivo con pilones de suelo.

La recolección de datos inició simultáneamente para ambos cultivos, sin embargo, esto se dio tres semanas después del trasplante del *Ophiopongo japonicus*, y una semana después del trasplante del *Arachis pintoii*. Para ambos cultivos se regó tres veces por día (6:15 a.m., 12:30 p.m. y 4:20 p.m.) durante las semanas previas a la toma de datos, garantizando así la rápida adaptación de los cultivos. Las siguientes semanas debido al temporal de lluvias se detuvo el riego, sin embargo, los días secos se regaba una vez por día en horas de la tarde.

Determinación de la influencia de la temperatura ambiental sobre la temperatura interna en unidades experimentales.

El impacto de la temperatura ambiente se evaluó a partir de los datos registrados por sensores localizados en el parque solar de la EAP, Zamorano y de las temperaturas internas de las UE. Se analizaron las temperaturas internas de las nueve unidades experimentales con la temperatura ambiente, considerando un intervalo de 15 minutos. Para conocer la interacción que existe entre las temperaturas internas de las UE y la temperatura ambiente, se realizó una correlación a través de la prueba de Rho-Spearman mediante el programa “SPSS Statistics” versión 20 con una significancia de $\alpha = 0.05$.

Registro de datos de temperatura en unidades experimentales. Se utilizaron los datos recopilados por “Dataloggers ELITCH®” los cuales tienen la capacidad de almacenar 32,000 datos con una frecuencia de 10 segundos a 24 horas. Para fines de la investigación se programó un intervalo de 15 minutos, y se ubicaron los “Dataloggers” en el centro superior de las UE, se tomó esta ubicación considerando que las unidades estaban completamente cerradas. Por lo tanto, al no contar con ventanas de ventilación, el centro fue una ubicación estratégica. Todas las UE contaban con una estructura de soporte para la colocación de los sensores.

La transferencia de datos se realizó cada sábado y se utilizó una hora de la mañana para su recolección, esta variaba acorde a las actividades del día. Por lo tanto, el tiempo de toma de datos fue de seis días y 23 horas a la semana, durante cinco semanas, iniciando el 30 de agosto del 2018. La extracción del contenido de los “Dataloggers” se realizó a través del programa “ElitechLog V3.0.0” obtenido de la página web oficial: www.elitech.uk.com.

Registro de datos de temperatura ambiental. Los datos de temperatura ambiente fueron recolectados a través de los sensores ubicados en el parque solar, los cuales registran variables climáticas a través del programa “Green Power Monitor (GPM)” con intervalos de cinco minutos durante las 24/7. Su extracción se realizó en formato Excel, a través de su página en línea “web3.greenpowermonitor.com”

Debido a factores externos se seleccionaron 19 días para el análisis, los cuales se encontraban distribuidos a lo largo de las cinco semanas registradas. Los datos de temperaturas internas y ambiente fueron divididos en dos rangos de tiempo, siendo estos de: 7:00 a.m. a 7:00 p.m. y viceversa. De esta forma, se evaluó el desempeño de los techos con y sin vegetación durante las horas diurnas y nocturnas. Dado que, se ha encontrado mejor desempeño en la reducción de temperaturas internas, las cuales se dan durante las horas de exposición al sol (Alpuche, 2010).

Evaluación del rendimiento térmico de las unidades experimentales.

El rendimiento térmico se evaluó a partir de las variaciones de las temperaturas internas de las UE con cobertura vegetal, frente a unidades testigo sin cobertura vegetal. Para ello, se construyó una base de datos que contempló las unidades experimentales con sus respectivas repeticiones, días, horas y temperaturas internas, manteniendo el intervalo de 15 minutos. De esta forma, se logró comparar si hay diferencia entre las unidades estudiadas, es decir, si la implementación de techos verdes se ve reflejada en la temperatura interna de sus unidades.

Análisis estadístico. Para el análisis de los datos obtenidos se utilizó el programa estadístico “Infostat” versión 2018 con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. A los datos de temperatura internas de las UE y temperaturas externas se les aplicó la prueba Shapiro-Wilk. Previo a la comparación de medias se realizó la transformación Vard-Ident a los datos de temperatura interna de 7:00 a.m. a 7:00 p.m. La comparación de medias fue a través del Modelo Lineal General Mixto (MLGM). El MLGM debe cumplir con los supuestos de normalidad, homocedasticidad e independencia. Dado que, se consideró tanto las variables fijas como aleatorias se define como modelo mixto logrando obtener un modelo ajustado a los datos climatológicos como lo es la temperatura.

Para el análisis, el modelo teórico utilizado fue:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \tau R_j + e_{ij} \quad [1]$$

Donde:

Y_{ij} = Variable dependiente

μ = Constante

τ_i = Tratamiento

τR_j = Tratamiento $\times$ Repetición

e_{ij} = Error

Para realizar las comparaciones se combinó entre las temperaturas internas de las unidades testigo y los techos verdes, ambos con sus respectivas repeticiones. Las diferentes unidades fueron ubicadas aleatoriamente, dado que, todas las UE eran homogéneas entre ellas. Así también, se codificó cada unidad experimental para su mejor entendimiento. A continuación, la Figura 4 muestra las unidades con sus respectivos códigos, siendo el subíndice el número de la repetición.

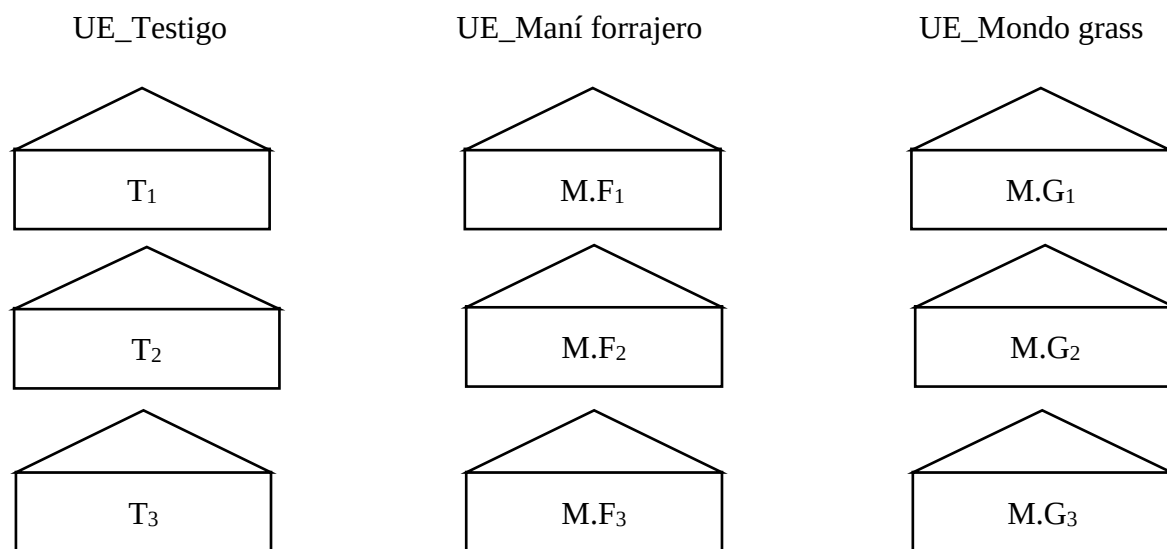


Figura 4. Identificación de las unidades experimentales.

A manera de conocer el techo verde que mejor desempeño tuvo durante el tiempo de investigación se realizó una prueba post-hoc. Considerando que la investigación es a escala de laboratorio y no se tuvo condiciones controladas, se aplicó una prueba de LSD Fisher.

Comparación de gradiente térmico en UE dotadas con techo verde.

El gradiente térmico es la diferencia entre la temperatura ambiente y las temperaturas internas de las UE. A mayor gradiente mayor estabilidad interna de las temperaturas, es decir, mejor desempeño de la propiedad aislante térmica de los techos verdes. Para la comparación se generaron gráficas de tendencia a partir del promedio de las temperaturas internas de los 19 días seleccionados, obteniendo así un valor horario por unidad experimental. Posteriormente, se identificó las horas con la temperatura ambiente más elevada, siendo estas de 10:00 a.m. a 3:30 p.m. El análisis inició con la prueba Shapiro-Wilk, seguido de la prueba Mann Whitney para verificar si existe diferencia significativa entre ambas unidades en el programa estadístico “SPSS Statistic” versión 20 con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Correlación entre las temperaturas internas de las UE y la temperatura ambiente.

Al comparar los valores de temperatura ambiente con la temperatura interna de las UE en horarios diurnos, se obtuvo que existe una influencia directa de la temperatura externa. Es decir, a mayor temperatura ambiente, mayor será el calor transferido al interior de las UE. Esto se respalda por valor de significancia menor a 0.05 que se obtuvo para todas las unidades analizadas (Cuadro 1). Los coeficientes obtenidos indican que la relación entre la unidad T es mayor que la obtenida para las unidades M.F y M.G. La variación entre los coeficientes de correlación se debe a la propiedad aislante de las diferentes capas que conforman el techo verde. Sin embargo, a pesar de esta condición, existían otras áreas expuestas a la temperatura ambiente como fueron las paredes de las UE carentes de propiedades aislantes, permitiendo la entrada de calor al interior de estas.

Cuadro 1. Correlaciones Rho de Spearman entre UE y temperatura ambiente (Diurno).

Unidad experimental	Variables		Temperatura ambiente (°C)
Maní Forrajero (M.F)	Temperatura interna (°C)	Coeficiente de correlación	0.745
		Sig.	0.000
		N	2730
Mondo Grass (M.G)	Temperatura interna (°C)	Coeficiente de correlación	0.768
		Sig.	0.000
		N	2730
Testigo T	Temperatura interna (°C)	Coeficiente de correlación	0.874
		Sig.	0.000
		N	2730

Las unidades M.F y M.G presentaron mayor coeficiente de correlación en comparación con las horas diurnas, esto se debe a la baja capacidad de los techos verdes en amortiguar la pérdida de calor del interior hacia el exterior (Cuadro 2). En ambos escenarios la unidad T presentó mayor influencia de la temperatura ambiente, reflejado en el registro de los menores gradientes de temperatura, ya que no cuentan con alguna tecnología y/o material que confiera aislamiento térmico, favoreciendo la fluctuación de la temperatura interna en proporción a las externas.

Cuadro 2. Correlaciones Rho de Spearman entre UE y temperatura ambiente (Nocturno).

Unidad experimental	Variables		Temperatura ambiente (°C)
Maní Forrajero (M.F)	Temperatura interna (°C)	Coeficiente de correlación	0.887
		Sig.	0.000
		N	2736
Mondo Grass (M.G)	Temperatura interna (°C)	Coeficiente de correlación	0.862
		Sig.	0.000
		N	2736
Testigo T	Temperatura interna (°C)	Coeficiente de correlación	0.919
		Sig.	0.000
		N	2736

Evaluación del desempeño de techos verdes como aislante térmico en UE.

Los datos de temperatura dependen de la hora del día, estos se encuentran asociados a la disponibilidad de radiación solar. Por esta razón, debido a que la variación de los datos es horaria, los análisis fueron separados en diurno y nocturno. Al aplicar la prueba de normalidad se obtuvo que las temperaturas internas diurnas de las UE tenían más variación entre ellas. A diferencia de las temperaturas internas nocturnas que presentaron una distribución normal, es decir, tenían menos variaciones entre ellas.

El resultado del análisis estadístico denota que las temperaturas internas diurnas de las unidades si presentan diferencias, es decir, al menos una de las unidades estudiadas no es igual a las demás. Durante la jornada nocturna, la temperatura interna de todas las UE presentó un comportamiento similar; esto se respalda mediante el valor $P > 0.05$ que se obtuvo (Cuadro 3). Por lo tanto, durante la noche no se refleja el beneficio de la propiedad aislante térmica por parte de los techos verdes.

Cuadro 3. Análisis de comparación de medias de las unidades experimentales

Unidades experimentales	P-valor
Diurno	0.0042
Nocturno	0.1577

Con base en el análisis anterior, se realizó la prueba post-hoc LSD Fisher, para determinar la unidad que mejor desempeño presentó amortiguando la transferencia de calor del exterior al interior de las UE en horario diurno. Se utilizó esta prueba debido a su flexibilidad con datos que no se encontraban bajo condiciones controladas, obteniendo así que, la unidad T es diferente significativamente en comparación con las unidades M.F y M.G, presentando una media de 1.24 °C menos que la media de la unidad T durante el día (Cuadro 4). Mientras tanto, las unidades dotadas de techos verdes presentaron diferencias muy similares.

Cuadro 4. Prueba post-hoc LSD Fisher (Diurno).

Unidades experimentales	Media	Error Estándar de la media	LSD Fisher
T	27.95	0.18	A
M.F	26.78	0.17	B
M.G	26.70	0.17	B

La Figura 5 muestra la tendencia de las temperaturas durante las 24 horas del día. En el mismo se observa que de 7:00 a.m. a 5:00 p.m. la temperatura ambiente se encuentra sobre las unidades de estudio. La capacidad de amortiguamiento por parte de los techos verdes interfiere en la transferencia de calor, manteniendo temperaturas más estables en el interior de las UE (Simmons, Gardiner y Windhager, 2008). La temperatura ambiente inicia su descenso antes que las UE, debido a la capacidad calorífica de los materiales de construcción, sin embargo, luego de un periodo de tres horas, los valores se igualan llegando a un punto de equilibrio donde las temperaturas externas e internas son iguales.

Posteriormente, se observa la estabilización de las temperaturas internas y externas, presentando un comportamiento similar entre todas las temperaturas. Esto hace referencia al estudio realizado por Liu y Minor (2005), quienes señalaron que los techos verdes son mejores amortiguando la entrada de altas temperaturas del exterior hacia el interior, que amortiguando la salida de las temperaturas del interior hacia el exterior.

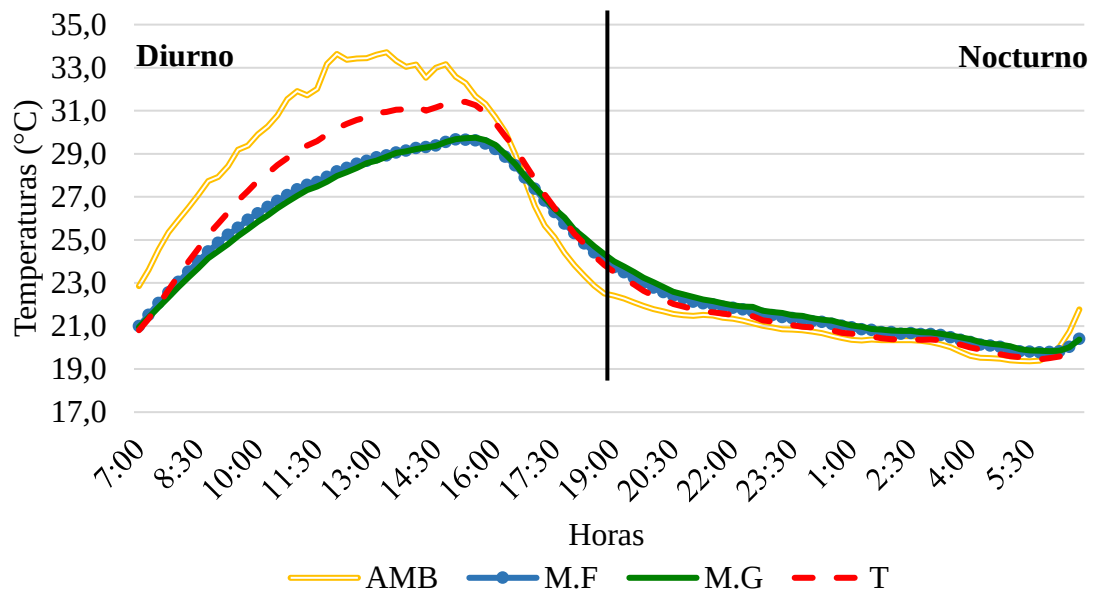


Figura 5. Comparación de tendencia de las temperaturas.

La Figura 6 muestra que el gradiente promedio entre la temperatura ambiente y las temperaturas internas de las unidades T es de 2.24 ± 1.85 , valor obtenido entre las 10:00 a.m. y 3:30 p.m., siendo este el periodo con mayor temperatura externa registrada. En

contraste, la Figura 7 muestra que, para las unidades M.F y M.G el gradiente promedio durante el rango de 10:00 a.m. a 3:30 p.m. fue de 4.09 y 4.22 ± 1.8 respectivamente. Estos resultados son congruentes con otros estudios realizados, donde se ha encontrado reducciones de 4.5 °C en el interior de una edificación, valor similar al obtenido en la presente investigación (Niachou et al., 2001; Bauder, 2012).

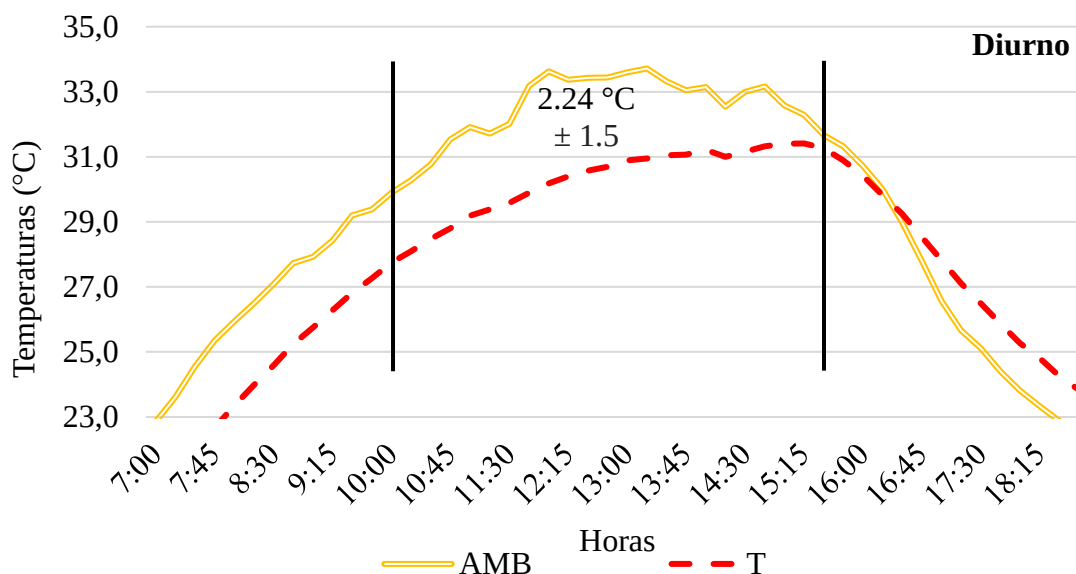


Figura 6. Diferencia entre la temperatura ambiente y la unidad testigo.

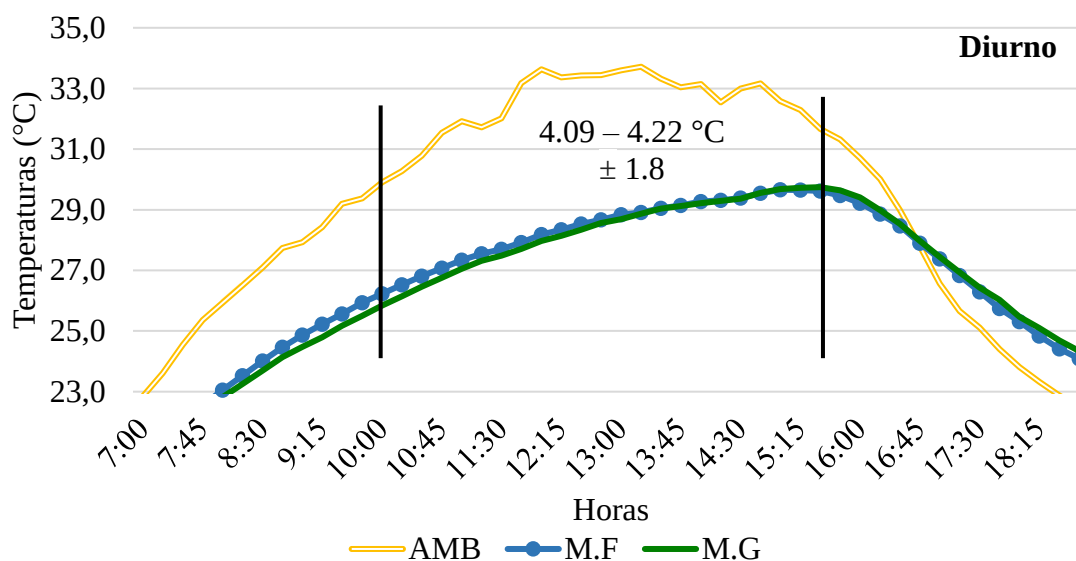


Figura 7. Diferencia entre la temperatura ambiente y los techos verdes.

La Figura 8 muestra la distribución de temperatura ambiente y de las unidades experimentales durante el día. Las unidades M.F y M.G presentaron menor variabilidad con medias, medianas, mínimos y máximos similares que variaban alrededor de 0.1 °C debido a su capacidad de amortiguar cargas térmicas. No obstante, la unidad testigo presentó el valor más bajo (20.8 °C), esto se debe a las bajas temperaturas que se tiene durante la noche las cuales se mantienen las primeras horas hasta que la temperatura ambiente asciende y paulatinamente comienza a transferirse hacia el interior de las unidades. El valor más alto se obtuvo al registrar 33.7 °C en la temperatura ambiente.

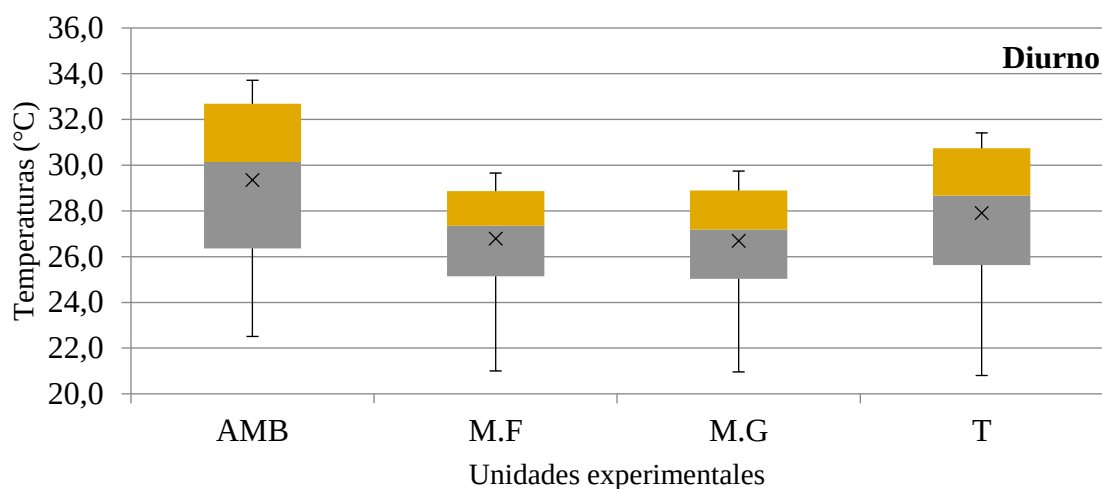


Figura 8. Comportamiento de las temperaturas durante el día (7:00 a.m. – 7:00 p.m.)

Comparación de gradiente térmico en UE dotadas con *Arachis pintoi* y *Ophiopongo japonicus*.

La función principal de la cobertura vegetal es evitar la incidencia directa de la radiación sobre el techo, aprovechándola para su proceso fotosintético, por lo tanto, a mayor densidad y porte del cultivo se obtendrá mejor eficiencia en aislación térmica (Minke, 2004; Dunnet, Nagase, Booth y Grime, 2008). El grosor de las capas afecta la transferencia de calor, por ello las unidades M.F y M.G mostraron diferencias entre la temperatura ambiente y las temperaturas internas de ambas UE con un valor $p = 0.034$. Así también, se encontró que si hay diferencia estadística en el gradiente de las unidades M.F y M.G (Figura 9). Basados en estos resultados se observó que la unidad M.G tuvo un mejor desempeño como aislante térmico en comparación con la unidad M.F.

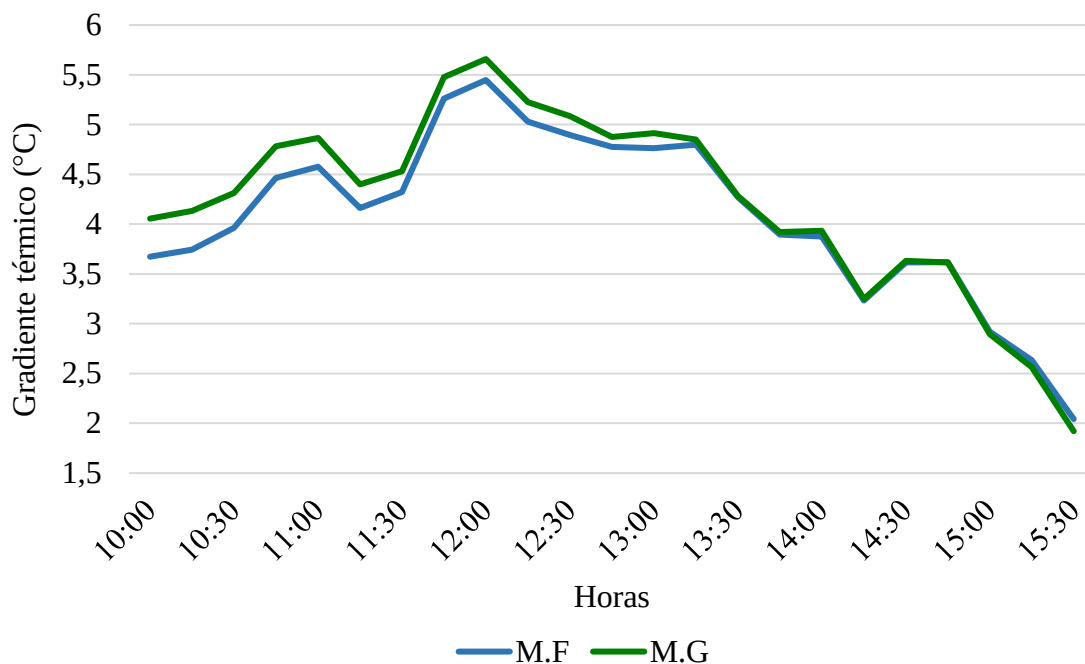


Figura 9. Diferencia numérica de gradiente entre las unidades M.F y M.G.

En la Figura 10 se observa que la cobertura vegetal de las unidades M.F cubrieron casi en su totalidad el área de estudio con un desarrollo promedio de aproximadamente 0.10 m de alto. Por el contrario, la unidad M.G (Figura 11), al ser de forma cespitosa presentaba mayor área descubierta, la misma que fue invadida por la especie *Eclipta alba* dos semanas después del establecimiento de los cultivos ante las continuas lluvias. La *Eclipta alba* es una planta medicinal considerada maleza en algunos países, la cual presentó un desarrollo promedio de 0.22 m de altura dentro de la unidad (Bhalerao, Verma, Teli y Murukate, 2013).

La especie invasora no fue retirada de las unidades M.G, a manera de mantener la característica de los techos verdes extensivos de bajo mantenimiento de la cobertura, siendo este un comportamiento que se podría encontrar en escenarios reales. Por lo tanto, la principal diferencia entre las unidades M.F y M.G fue el grosor que alcanzaron los medios de cobertura, siendo de 0.10 m para los cultivos de *Arachis pinto* (M.F). El cual, al ser un cultivo de bajo porte permitió mayor contacto de la radiación y la temperatura externa con el sustrato. Mientras que en la unidad dotada de *Ophipongo japonicus* (M.G), el cultivo *Eclipta alba* alcanzó una altura de 0.22 m, siendo más alta y densa evitando el contacto de las variables climáticas con el sustrato, por lo tanto, la transferencia era más lenta y su desempeño como aislante térmico fue mejor.



Figura 10. Unidad experimental M.F



Figura 11. Unidad experimental M.G
con *Eclipta Alba*.

4. CONCLUSIONES

- La temperatura ambiente influye directamente sobre la temperatura interna de las unidades experimentales. La capacidad calorífica de los materiales de construcción y su exposición directa a la temperatura externa favorece la velocidad de transferencia de calor, incluso cuando las unidades se encontraban dotadas de techos verdes. Por lo tanto, a mayor temperatura ambiente, mayor será la temperatura registrada en el interior de las UE.
- La comparación demostró que la reducción de transferencia de calor obtenida por parte de las unidades M.F y M.G es significativa. Las unidades dotadas de cobertura vegetal presentaron un mejor desempeño como aislantes térmicos reduciendo hasta 4.22 °C en comparación con las unidades testigos en horarios diurnos. En horas nocturnas ante temperaturas más templadas esta propiedad no presenta el mismo desempeño, derivando en menores fluctuaciones para los valores de temperatura interna y gradiente térmico.
- La diferencia de grosor de los medios de cobertura entre las unidades dotadas de techos verdes influye en la transferencia de calor. Por lo tanto, si los cultivos tienen mayor altura y cubren más área presentarán un mejor desempeño como aislante térmico, comparado con cultivos de menor grosor y mayor área expuesta a la temperatura ambiente.

5. RECOMENDACIONES

- Estudiar el desempeño de los techos verdes en unidades experimentales abiertas, incluyendo el efecto de ventilación como medida adicional de enfriamiento.
- Incorporar el efecto de las variables climáticas de precipitación, radiación y velocidad de viento sobre el desempeño de las unidades con techos verdes y testigos.
- Evaluar el efecto del grosor de cobertura vegetal que permitan observar la influencia en la transferencia de calor de exterior al interior de las unidades experimentales.

6. LITERATURA CITADA

- Alpuche, M. (2010). Análisis térmico de viviendas económicas en México utilizando techos verdes. *Estudios sobre arquitectura y urbanismo del desierto*, 59-67.
- Barba, A. (Marzo de 2014). ¿Qué son las azoteas verdes? Conócelas e impleméntalas. *La Vanguardia*. <https://perfilesalavanguardia.com/2014/03/31/que-son-las-azoteas-verdes-conocelas-e-implementalas/>.
- Bauder. (2012). *Vegetation for extensive & biodiverse green roofs*. Obtenido de Bauder: <https://www.bauder.co.uk>
- Beltrán, A., Vargas, M., Pérez, A., & García, C. (2014). Thermal comfort of green roofs with *Cissus verticillata* (Vitaceae) in tropical rural dwellings. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*(9), 1551-1560.
- Bhalerao, S., Verma, D., Teli, N., & Murukate, V. (2013). *Eclipta alba* (L.): An overview. *International Journal of Bioassays*, 1443 - 1447.
- Contreras, E., & Castillo, I. (Diciembre de 2015). Guías de azoteas vivas y cubiertas verdes. *Área Ecológica Urbana*. Barcelona, España.
- Desjarlais, A., Zaltash, A., & Jerald, A. (2010). Thermal performance of vegetative roofing systems. *Proceedings of 25th RCI International Convention*. Orlando, Florida.
- Dunnet, N., Nagase, A., Booth, R., & Grime, P. (2008). Influence of vegetation composition on runoff in two simulated green roof experiments. *Springer Science*, 385-398.
- García, I., Morales, J., & López, I. (2010). Las características higrotérmicas de la vegetación en los sistemas de naturación extensiva.
- Gavilanes, M. (2015). Techos verdes: prácticas de gestión ambiental en áreas urbanas. *Monografía previa a la obtención del título de Licenciado*. Quito, Ecuador.
- Getter, K., & Rowe, B. (2006). The role of extensive green roofs in sustainable development. *41*(1276).
- GreenMetric. (2010). *Criteria & Indicators*. Obtenido de UI GreenMetric. World University Rankings: <http://greenmetric.ui.ac.id/criterion-indicator/>

- Ibañez, R. (2008). Techos vivos extensivos: Una práctica sostenible por descubrir e investigar en Colombia. *Extensive living roofs*, 24-33.
- Jim, C., & Peng, L. (2012). Weather effect on thermal and energy performance of an extensive tropical green roof. *ELSEVIER*, 73-85.
- Joseph, A. (2015). Green roofs: Amal Jyothi College of Engineering . doi:10.13140/RG.2.1.1845.8966
- Liu, K., & Minor, J. (2005). *Performance evaluation of an extensive green roof*. Toronto, Canadá: Greening Rooftops for Sustainable Communities.
- Mastronardi, L., Sfeir, A., & Sánchez, S. (Agosto de 2016). *La temperatura y su influencia en la demanda de energía eléctrica: Un análisis regional para Argentina usando modelos econométricos*. Obtenido de Ministerio de Energía y Minería: <http://datos.minem.gob.ar/dataset/f3552056dfb94b99a1b8cebf9e3d6a24/resource/2cf973bf-6de9-43a681d0c9fdb88db94/download/as14946098911.pdf>
- Minke, G. (2004). *Techos verdes: Planificación, ejecución, consejos prácticos* (Vol. I). Montevideo: Fin del siglo. doi:ISBN 9974-49-323-4
- Niachou, A., Papakonstantinou, K., Santamouris, M., Tsangrassoulis, A., & Mihalakakou, G. (2001). Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. *ELSEVIER*, 719-729.
- Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R., Doshi, H., Dunnet, N., Rowe, B. (2007). Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions, and services. *Bioscience*, 57, 823-824. doi:10.1641/B571005
- Ordóñez López, E. E., & Pérez Sánchez, M. M. (2015). Comparación del desempeño térmico de techos verdes y techos blancos mediante técnicas IR. *Acta Universitaria*, 25(5), 11 - 19. doi: 10.15174/ au.2015.782
- Pérez, M. (29 de Enero de 2013). *Ophiopogon japonicus*. Obtenido de Botánica y Jardines: <http://www.botanicayjardines.com/ophiopogon-japonicus/>
- Rámirez, W., & Bolaños, T. (2012). Revisión sobre el papel de los techos verdes en la remoción de carbono atmosférico en el neotrópico. 6.
- Rhodes, M. (2012). *Implementación de un modelo de techo verde y su beneficio térmico en un hogar de Honda, Tolima (Colombia)*. Obtenido de Pontificia Universidad Javeriana: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/8985/RhodesValbuenaMateode2012.pdf;sequence=1>
- Rincón, A., Cuesta, P., Pérez, R., Lascano, C., & Ferguson, J. (1992). *Maní Forrajero Perenne*. Obtenido de Centro Internacional de Agricultura Tropical: <http://ciat->

library.ciat.cgiar.org/Articulos_Ciat/Digital/ICA_000045C.2_Man%C3%AD_forrajero_perenne_Arachis_pintoi_Krapovickas_y_Gregory_Una_alternativa.pdf

- Simmons, M., Gardiner, B., & Windhager, S. (2008). Green roofs are not created equal: the hydrologic and thermal performance of six different extensive green roofs and reflective and non-reflective roofs in a sub-tropical climate. *Urban Ecosyst*, 339-348. doi:10.1007/s11252-008-0069-4
- Torres, A., & Morillón, D. (2007). Evaluación del uso de techos verdes en clima templado: caso ECATEPEC de morelos, Estado de México, México. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 183-190.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2008). Green roof. *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies*. Obtenido de <https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium>
- Universidad Zamorano. (14 de Febrero de 2017). *Ranking de Universidades Ambientales del Mundo Posiciona a ZAMORANO 1.er Lugar en Centroamérica*. Obtenido de Universidad Zamorano: <https://www.zamorano.edu/2017/02/14/ranking-de-universidades-ambientales-del-mundo-posiciona-zamorano-1-er-lugar-en-centroamerica/>
- Valbuena, S., & Tibasosa, A. (16 de agosto de 2016). *Estudi de pre-factibilidad técnica, ambiental y económica para la implementación de terrazas verdes en el control empresarial La Castellana de Bogotá*. Obtenido de Universidad Distrital Francisco José de Caldas: <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/3341/1/ValbuenaLesmesSteven2015.pdf>
- Villa, F. (2009). California Academy of Sciences . *Construcciones verdes*. San Francisco.

7. ANEXO

Anexo 1. Fuerza de las relaciones

Proporción y porcentaje de la variación en Y aplicada por X		
Coeficiente de correlación	%	Fuerza de la relación
1.00	100	Relación perfectamente positiva
0.90	81	Muy fuerte positiva
0.80	64	
0.70	49	Moderadamente fuerte positiva
0.60	36	
0.50	25	
0.40	16	Moderadamente débil positiva
0.30	9	
0.20	4	
0.10	1	Muy débil positiva
0.00	0	No existe relación

Fuente: (Ritchey, 2007)