

Evaluación térmica de la sustitución del material de la capa de drenaje en techos verdes por llantas usadas - análisis experimental en el II periodo húmedo climático del 2016, Bogotá

Thermal assessment of the replacement of the drainage layer material in green roofs by used tires - experimental analysis in a II climatic moist period of 2016 in Bogotá, Colombia

Juan Antonio Aragón Moreno¹, Juan David Espitia Gonzalez²

¹Universidad Libre, Bogotá, Colombia, juan.aragon@unilibrebog.edu.co

²Universidad Libre, Bogotá, Colombia, juan.espitiag@unilibrebog.edu.co

Fecha de recepción: 15/06/2017

Fecha de aceptación del artículo: 09/11/2017



Este obra está bajo una licencia de Creative Commons
Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional.

DOI: doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.1275

Cómo citar:

Aragón Moreno, J., & Espitia González, J. (2017). Evaluación térmica de la sustitución del material de la capa de drenaje en techos verdes por llantas usadas - análisis experimental en el II periodo húmedo climático del 2016, Bogotá. AVANCES: Investigación en Ingeniería, 14, 21-36. doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.1275.

Resumen

En la ciudad de Bogotá, las llantas usadas terminan en calles, humedales e incluso en espacios residenciales representando un problema estético, sanitario y medioambiental. Analizar cuantitativamente la ventaja de regulación térmica de los techos verdes modificados con neumáticos en comparación a los techos verdes extensivos convencionales es objeto de este estudio.

Mediante prueba piloto se construyeron seis edificaciones a escala, por dos grupos manejados: Eternit® gris de fibrocemento y teja de barro tipo español. Se tomaron en campo los datos de temperatura interna (T_i) y ambiente (T_a) dos veces al día en condiciones climáticas de una temporada húmeda en Bogotá y se describieron estadísticamente estableciendo un diferencial de temperatura. Los resultados muestran que, los techos verdes convencionales atenúan en definitiva la temperatura interna de las construcciones en relación con el sistema de control para cada grupo, cerca de $0,5^{\circ}\text{C}$; sin embargo, se observaron diferencias entre el comportamiento de los techos con los sustitutos de drenaje, aumentando $0,2^{\circ}\text{C}$ para Eternit®, y disminuyendo $0,5^{\circ}\text{C}$ para española.

Palabras claves: Aislante, Cambio Climático, Llantas, Reciclaje, Regulación térmica, Techos verdes.

Abstract

In the Bogota city, the used tires end in streets, wetlands and even in residential spaces, representing an aesthetic, sanitary and environmental problem. To analyze quantitatively the advantage of thermal regulation of these modified with tires in comparison to the green roofs extensive conventional is the object of study. By means of pilot test six buildings were constructed to scale, for two groups handled of agreement to the type of roof: Eternit® gray fiber cement and Spanish clay tile. The information of temperature internal temperature (Ti) and the temperature environment (Ta) were taken in the field two times a day in climatic conditions of a moist season in Bogota. The results show that, the conventional green ceilings ultimately attenuate the internal temperature of the constructions relative to the control system for each group, about 0,5°C; However, differences were observed between the behavior of ceilings with drainage substitutes, increasing 0,2 ° C for "Eternit®", and decreasing 0,5 ° C for "Española".

Keywords: Insulation, Climate Change, Tires, Recycling, Thermal Regulation, Green Roofs.

1. Introducción

En la ciudad de Bogotá se estima que, de 2,5 millones de llantas que cumplen su vida útil por año, aproximadamente 750 mil terminan dispuestas en andenes, parques, humedales e incluso en espacios residenciales [1] que además de representar un problema estético y de percepción de desorden en el paisaje, conlleva entre otras al estancamiento de aguas para la proliferación de mosquitos y plagas comprometiendo la salud de quienes están expuestos directa o indirectamente a ellas [2], más aún cuando son quemadas a cielo abierto para obtener el acero que las conforman, emitiendo a su vez contaminantes orgánicos permanentes, clorocarbonados [3], y gases de efecto invernadero que conlleva al aumento progresivo de la temperatura de la tierra como una de las consecuencias del calentamiento global [4]. Las llantas que cumplen su vida útil y que no van a parar en espacios públicos de la capital,

son destinadas en un 6,2% para uso artesanal, 19,5% para reencauche, 2,3% como materia prima para la producción de pavimento asfáltico, caucho y alfombras, y un 71,9% restante para el aprovechamiento energético en hornos cementeros y termoeléctricas requiriendo altos controles operacionales en sus chimeneas [5].

Otras alternativas de uso para el caucho de llantas diferentes a las mencionadas en el párrafo anterior, con el fin de prolongar su vida útil y ser parte del conjunto de tecnologías que se ponen frente a la adaptación y mitigación al cambio climático, son los techos verdes [6], donde al acoplarlos en la estructura de los techos verdes como capa de drenaje, su evaluación de ciclo de vida marca una reducción del 7% en términos de impacto ambiental generado por un sistema convencional, de acuerdo al estudio realizado por Rincón et al. (2013) [7]. El mejoramiento de la retención de agua lluvia en el sistema con la mezcla del 6% de caucho triturado

y sustrato, resulta ser ideal y una alternativa más de conjugar el material con esta tecnología [8].

Estos techos verdes Oberndorfer et al. (2013) [9] los definen como estructuras ubicadas sobre los tejados de las edificaciones con una cobertura total o parcial de material vegetal [10] que permiten generar espacios de confort y bienestar [11] cuando la densidad de las edificaciones no permite la disponibilidad de áreas verdes [12]. Entre otras ventajas como la preservación de la biodiversidad, mitigación de la isla de calor, manejo y retención de escorrentías de aguas lluvia [13], agentes de captura de contaminantes atmosféricos, y el aislamiento acústico y térmico en las edificaciones [14]. Generalmente se clasifican en dos categorías, techos verdes intensivos y extensivos, estos últimos [12] los caracteriza por representar un bajo peso de carga (70-170 kg/m²) y limitados a plantas pequeñas como pastos, hierbas, flores y plantas herbáceas [6].

Beltrán et al. (2014)[10], determinaron que un techo verde en la ciudad de México reducía la carga térmica interior entre 3,4 y 4,5°C en comparación a una habitación de la misma vivienda que no contaba con él. De igual forma en Buenos Aires Rosatto et al. (2016) [15], concluyeron que las azoteas verdes reducían cerca del 11 y 7% en el mes de enero y febrero respectivamente, y un 38% con respecto a la temperatura ambiente. En cuanto a Colombia, el ecólogo Valbuena (2012) [16], determinó que un techo verde instalado en un tejado de fibrocemento en Honda, Tolima, reduce la temperatura interna de la habitación 0,46°C con techo verde, y 0,1°C sin él, en relación con la temperatura ambiente.

Es por todo ello, que el presente estudio ha optado por buscar un segundo uso a las llantas desechadas del sector automotriz de la ciudad de Bogotá, adicionándolas en la estructura de los techos verdes como capa de drenaje, que por sus cualidades aislantes podrían beneficiar la ventaja de regulación térmica de estos últimos en las edificaciones en las que se instalan desde el punto de vista cuantitativo, en las condiciones climáticas normales de la ciudad y para los tejados de las estructuras convencionales de Bogotá. Como un camino de investigación y estudio, se tiene como finalidad determinar si al adicionar en la estructura de los techos verdes extensivos tradicionales llantas usadas, altera la regulación térmica de estos. Lo anterior mediante la construcción de seis edificaciones a escala de forma experimental en el campus de la Universidad Libre, Bosque Popular; y la toma de datos cuantitativos de temperatura en campo, con un termómetro IR EIR-1000 y una estación meteorológica semiautomática Davis Vantage Pro 2 Plus dos veces al día, de lunes a viernes, para el II Periodo Húmedo del 2016 correspondientes a los meses de septiembre, octubre y noviembre de acuerdo a la clasificación climática por el IDEAM & FOPAE (2007) [17].

Por último, es de importancia resaltar que los resultados aquí presentados aportan a las investigaciones y estudios de techos verdes en el contexto colombiano de los cuales son escasos, más aún cuando se trata a condiciones de la ciudad de Bogotá, como medida de respuesta y técnica de mitigación y adaptación al cambio climático en el contexto de ciudades sostenibles.

2. Materiales y métodos

El presente proyecto se llevó a cabo bajo el principio de investigación experimental y método científico desarrollado por tres etapas principales con el fin de alcanzar los objetivos propuestos en la investigación.

a. Diseño y construcción de las edificaciones y prototipos de los techos verdes

Consta de la construcción de seis edificaciones a escala (35x46x30 cm), diferenciado por dos grupos principales de acuerdo al tejado usado; 3 tejas tipo Eternit® gris (39x50 cm) y 3 tipo española (46x28 cm), ver Figura 1.

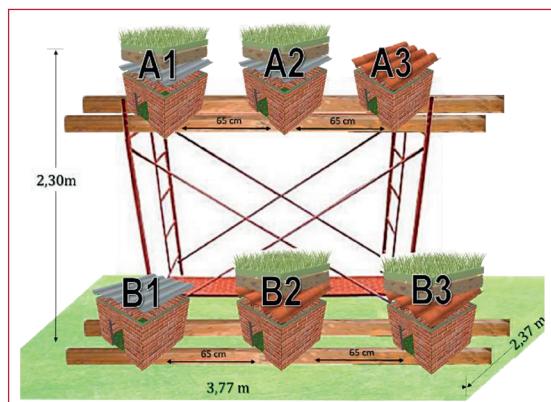


Figura 1. Diseño experimental del montaje de las seis casitas construidas.

Para cada casa construida se requirieron de 18 ladrillos tipo común (20x10x6 cm) para un total de 108 unidades, y una mezcla de 1/4 de bulto de cemento y 1/2 saco de arena. Tres de estas construcciones: A1, A2 y A3, se montan en un andamio que cubre un área de 8,9 m² y dos listones de madera donde se sitúan los tres prototipos construidos, ver Figura 2.



Figura 2. Montaje y construcción de las seis casitas en un área total de 8,9 m². Fotografía tomada el 14 de Julio de 2016.

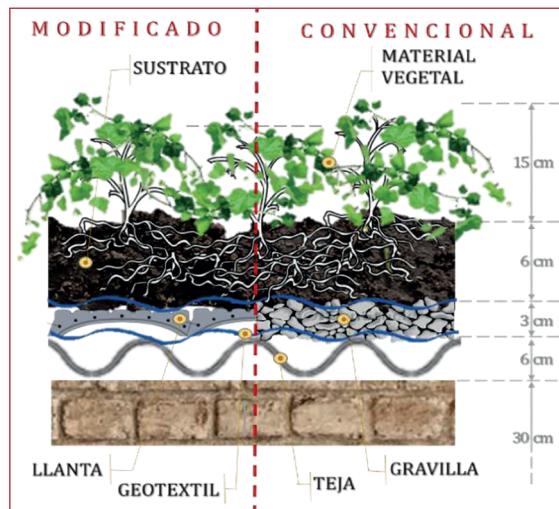


Figura 3. Diseño experimental del perfil desarrollado para los prototipos de techos verdes extensivos convencional y modificado.

Es importante señalar que, dos tejados de los tres correspondientes para cada grupo, son cubiertos por los techos verdes montados en un cajón de madera (34x48x10 cm), que se llamarán “Convencionales”, el cual cuentan con las capas correspondientes en orden ascendente comenzando con una lámina de geotextil, 3 cm de gravilla mona, nuevamente geotextil, 6 cm de tierra con abono de cascarilla y

4 plantas, *Hedera Helix* conocida como Hiedra uña de gato, de acuerdo al manual de techos verdes de la alcaldía de Bogotá y la Secretaría de Ambiente Distrital [18], ver Figura 3.



Figura 4. Montaje y construcción del perfil de techo verde con una profundidad total de 9 cm de la superficie del sustrato hasta la superficie de la teja. Fotografía tomada el 20 de enero de 2017.

Dos de estas cuatro cajas de techos verdes, A2 y B2, denominados “Con llanta”, son modificados con banda de caucho de llanta cuyo espesor alcanza los 2 cm, ver Figura 4. Las dos edificaciones restantes, A3 y B1 corresponden a medios de “Control” del experimento.

b. Toma experimental de los datos de temperatura de los diferentes prototipos descritos

Consta de la toma de los datos de temperatura interna en la edificación en °C, con un termómetro manual láser IR EIR-1000 con una precisión de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ a 5cm bajo el tejado, ver Figura 5. Esta medición se

realizó de lunes a viernes en los meses mencionados.

En cuanto a los horarios de toma de datos, se siguieron los lineamientos dados por la Organización Mundial Meteorológica (1992), WMO [19], en el Modelo de datos de Temperatura por el Manual de Procesamiento de Datos Globales clasificados por regiones, correspondiente a Sur América, en el que Colombia hace parte; donde se establecen como horas estándar de observación principal de datos meteorológicos a las 00, 06, 12 y 18 UTC (Coordinated Universal Time), representando las 19:00, 1:00, 7:00 y 13:00 horas colombianas respectivamente, adoptando para este proyecto la toma de datos a las 7:00 y 19:00 horas local.



Figura 5. Termómetro Láser IR EIR-1000.



Figura 6. Estación Meteorológica Davis Vantage Pro 2 Semiautomática.

Estos datos son almacenados en una base de datos elaborada con el Software Excel Office, a su vez con las variables meteorológicas reportadas de forma horaria, con una estación meteorológica automática Davis Vantage Pro 2 Plus con una precisión de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, ver Figura 6, y la ayuda informática del Software Davis Pro WeatherLink.

c. Análisis estadístico de los datos tomados de forma experimental

Con los datos de temperatura tomados en campo se realiza una descripción estadística de las medidas de tendencia central, de distribución normal o Gaussiana, media, mediana, moda, desviación estándar y varianza, además de sobresaltar los máximos y mínimos valores de temperatura registrados en el periodo referenciado; parámetros esenciales

para analizar esta distribución normal, cumpliendo con el teorema del límite central. Para el caso de este estudio, corresponde al comportamiento característico de la suma diaria de los valores de la temperatura, con el fin de obtener la temperatura media mensual, puesto que los valores diarios de la temperatura pueden exhibir notables asimetrías, pero convencionalmente, la temperatura diaria es aproximadamente el promedio de las máximas y mínimas registradas. Por lo que este comportamiento puede ser constatado como:

$$\bar{T} = \frac{1}{30} \sum_{i=1}^{30} \frac{T_{\text{Max}}(i) + T_{\text{min}}(i)}{2} \quad (1)$$

Ecuación 1.

Reiterando que la distribución Gaussiana es la que mejor representa el comportamiento de la temperatura media mensual para este estudio.

- *Análisis térmico de los datos tomados de forma experimental*

Luego de analizar los datos estadísticamente, se establece un diferencial de temperatura, como se describe en las ecuaciones 2, 3 y 4 respectivamente, estas ecuaciones se desarrollaron de las propuestas por Gaisford, Kett, & Haines (2016) [20], de análisis diferencial térmico. Se establece de esta forma una comparación directa entre el ambiente externo y el interior de las estructuras (ec.2), y los distintos prototipos construidos: sin techo verde (ec.3), con techo verde convencional y cuando el techo es alterado con llantas desechadas (ec.4), para los dos grupos de tejados. Lo anterior permite determinar de qué manera la

adicción de los neumáticos a la estructura de los techos verdes tradicionales altera la calidad de regulación térmica de estos en la edificación, en el contexto de una temporada húmeda en Bogotá.

$$\Delta T_1 = T(^{\circ}\text{C})_{\text{interna}} - T(^{\circ}\text{C})_{\text{ambiente}} \quad (2)$$

$$\Delta T_2 = T(^{\circ}\text{C})_{\text{interna}} - T(^{\circ}\text{C})_{\text{control}} \quad (3)$$

$$\Delta T_3 = T(^{\circ}\text{C})_{\text{t.v con llanta}} - T(^{\circ}\text{C})_{\text{conven.}} \quad (4)$$

3. Análisis y Resultados

En la siguiente sección se muestran los resultados experimentales de temperatura obtenidos para las dos mediciones diarias contempladas en la metodología, durante los meses de septiembre a noviembre del 2016 a condiciones climáticas normales de la ciudad de Bogotá; registrando una precipitación durante el tiempo mencionado de 353,2 mm, lo que es consistente con la climatología propia de Bogotá.

a. Análisis y Resultados para la Medición No. 1

Correspondiente a las mediciones realizadas a las 7:00 de la mañana, que muestra el comportamiento que han tenido las edificaciones durante la noche, en la Tabla 1, se encuentra la descripción estadística de los datos de temperatura tomados en campo correspondiente al cálculo de las medidas de tendencia central con un nivel de confianza del 95% dado por el software excel.

Con una humedad relativa promedio del 90% y una radiación solar media de 66 W/m², en la Tabla 1 se puede diferenciar que, con un total de 57 datos analizados en los tres meses descritos, la temperatura media ambiente alcanza los 12,1°C, con una máxima de 14,4°C registrada el mes de noviembre, y una mínima de 8,5°C presentada en el mes de octubre. Además de ello, presenta una distribución homogénea, con desviación estándar de ±1,3°C.

En cuanto al grupo de construcciones de tejado tipo Eternit®, el techo verde convencional alcanzó un valor máximo de temperatura interna de 20,8°C en el mes de octubre y un valor mínimo de 9,8°C registrado en el mismo mes, con una desviación de datos tomados oscilando entre ±2,4°C con respecto a su media. Ahora bien, el techo verde modificado con llantas en el tejado gris registró una temperatura media de 15,5°C, y una máxima y mínima de 22,7 y 9,8°C presentados en el mes de octubre, siendo 15,2°C la temperatura de mayor frecuencia en los 57 datos analizados, ver Tabla 1.

El tejado tipo español con una desviación de sus datos de ±2,6°C, registró un valor máximo de temperatura interna cerca de los 21,6°C y un valor mínimo de 9,1°C en el mes de octubre. A su vez con el valor más bajo de temperatura interna registrado en la Medición No. 1 y presentado en el mismo mes, el techo verde modificado con llantas en el tejado tipo español llegó hasta los 8,9°C y una temperatura interna máxima de 21,1°C.

Tabla 1. Descripción estadística de datos de temperatura para la Medición No. 1: 7:00 horas locales.

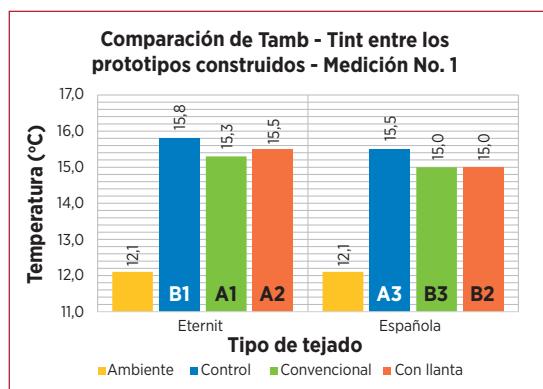
Medida	Tejado Tipo Eternit®			Tejado Tipo Español			Temp. Ambiente
	Control	Conven.	Llanta	Control	Conven.	Llanta	
Media	15,8°C	15,3°C	15,5°C	15,5°C	15,0°C	15,0°C	12,1°C
Mediana	15,3°C	15,2°C	15,2°C	15,3°C	14,7°C	14,5°C	11,9°C
Moda	14,5°C	14,5°C	15,2°C	17,1°C	14,1°C	13,7°C	11,6°C
Mínimo	9,3°C	9,8°C	9,8°C	9,2°C	9,1°C	8,9°C	8,5°C
Máximo	22,3°C	20,8°C	22,7°C	21,6°C	21,6°C	21,1°C	14,4°C
Desviación estándar	2,9°C	2,4°C	2,5°C	2,6°C	2,5°C	2,5°C	1,3°C
Varianza muestral	8,2	5,9	6,0	6,9	6,1	6,3	1,7
No. datos	57	57	57	57	57	57	57

Por otro lado, se resalta que, las temperaturas registradas en las distintas edificaciones sin importar si tienen techo verde o hayan sido modificados con llantas, se encuentran sobre la temperatura media ambiente. Comportamiento mostrado de igual forma en el estudio realizado por Cardoso & Vecchia (2012) [11] donde determinaron que las temperaturas internas de las distintas edificaciones muestran estar por encima de la temperatura del aire. Al igual que lo estudiado por Jim (2015) [21], Simmons, Gardiner, & Windhager, (2008) [22], y Valbuena (2012) [16]; teniendo en cuenta los lugares de estudio a condiciones climáticas distintas, para China, Estados Unidos y Colombia respectivamente.

Con respecto a la segunda parte de la metodología propuesta, en la Tabla 2 se muestran los gradientes de temperatura calculados con las ecuaciones correspondientes (campo “Ec.” de la tabla); teniendo en cuenta que cuando el gradiente da como resultado negativo, corresponde a la disminución en la temperatura en relación con el punto de referencia (campo

de “Ref.” de la tabla); y caso contrario, un valor positivo denota un incremento.

La Figura 7, refleja la comparación entre temperaturas internas de las edificaciones en relación con la temperatura media ambiente y entre ellas.

**Figura 7.** Relación de Temperatura Ambiente vs Temperatura Interna de los prototipos construidos en la medición No. 1.

Se observa que, la temperatura interna de cada una de las construcciones durante la noche muestra ser mayor a los 12,1°C correspondiente a la temperatura media

ambiente; al presentar un diferencial de 3,7°C (30,6% de más) para el tejado tipo Eternit® (B1), y para el tipo español (A3)

un aumento de 3,4°C, representando un incremento del 28,1% con respecto a la temperatura ambiente.

Tabla 2. Gradientes de temperatura calculados para el comportamiento del experimento en la Medición No. 1.

Ec.	Ref.	Tejado Eternit®			Tejado Español		
		Control	Convencional	Con Llanta	Control	Convencional	Con Llanta
T. Ambiente	15,8°C	15,3°C	15,5°C	15,5°C	15,0°C	15,0°C	15,0°C
1	12,1°C	3,7°C	3,2°C	3,4°C	3,4°C	2,9°C	2,9°C
2	Control	-0,5°C	-0,3°C	Control	-0,5°C	-0,5°C	
3	Convencional	0,2°C	Convencional	0,0°C			

Resultados que muestran ser coherentes con los registrados por Simmons, Gardiner, & Windhager (2008) [22], donde los techos verdes manejados en tejados negros y blancos en un clima subtropical presentan un aumento de la temperatura interna entre 3 y 5°C en un día soleado de invierno. Al igual que lo reflejado por Collins (2016) [23], donde la temperatura interna en el día más frío de invierno oscilaba entre 5 y 8°C con respecto a la temperatura ambiente. Hay que mencionar además que el tejado español en la construcción de control, resulta ser una mejor opción para mantener hasta en un 2,5% la temperatura interna por debajo en comparación al control B1.

Para los techos verdes convencionales, se puede mencionar que atenúan en definitiva la temperatura interna de las construcciones con relación al sistema de control para cada grupo, puesto que en la Figura 7 se muestra que la construcción con techo verde tanto en el tejado Eternit® (A1) alcanzando en promedio los 15,3°C, como en el tejado tipo español con 15,0°C, mostraron una tendencia de disminución

de 0,5°C (3,2%) la temperatura interna en relación con B1 y A3 respectivamente.

Estos resultados muestran ser coherentes con los reportados por Valbuena (2012) [16] donde en Honda, Tolima, el techo verde llegó a reducir 0,57°C la temperatura interna en comparación a la vivienda que no contaba con esta tecnología. Sin embargo, estudios como el de Forero & Devia (2011) [24], determinaron que un ecotecho productivo en el municipio de Soacha, Cundinamarca, Colombia, llegó a disminuir aproximadamente 3°C la temperatura interna, y entre 3,4°C y 4,5°C para Beltrán et al. (2014) [10]. Rosatto et al. (2016) [15] por el contrario reportaron una disminución de hasta 2°C (7%) con respecto a un tejado de referencia, teniendo en cuenta que el estudio fue realizado en Argentina, y la temperatura ambiente alcanzó los 29°C. Finalmente el techo verde convencional en el tejado Eternit® mantiene 2,5% la temperatura interna de más, sobre la registrada en el tipo español de la misma característica.

Como último parámetro de comparación para esta medición, se muestra además en

la Figura 7, que el techo verde modificado con llantas describe un comportamiento de atenuación térmica igual que un techo verde tradicional si es instalado en un tejado tipo español (B2), puesto que tiende a mantener la temperatura interna con respecto al tejado B3. Por el contrario, el tejado gris tipo Eternit® (A2) incrementó la temperatura 0,2°C (1,3%) en comparación a la regulada por el techo verde tradicional y 0,3°C (1,9%) por debajo de la de control.

a. Análisis y resultados para la medición No. 2.

De igual forma a lo desarrollado en el subtítulo anterior, en la Tabla 3 se en-

cuentra la descripción estadística de los datos de temperatura tomados en campo como resultado de esta medición a las 19:00 hora local, reflejando el comportamiento térmico de las construcciones durante el día.

Con una humedad relativa promedio del 81% se puede diferenciar que, con un total de 57 datos analizados, la temperatura media ambiente alcanza los 14,3°C, con una máxima de 16,2°C registrada el mes de octubre, y una mínima de 11,7°C en el mes de noviembre. Además de ello, presenta una distribución homogénea, con desviación estándar de ±1,0°C.

Tabla 3. Descripción estadística de datos de temperatura para la Medición No. 2: 19:00 hora local.

Medida	Tejado Tipo Eternit®			Tejado Tipo Español			Temp. Ambiente
	Control	Conven.	Llanta	Control	Conven.	Llanta	
Media	16,4°C	16,8°C	16,9°C	16,0°C	17,2°C	16,9°C	14,3°C
Mediana	16,4°C	16,7°C	16,9°C	16,1°C	17,2°C	17,0°C	14,4°C
Moda	14,2°C	17,0°C	16,2°C	15,5°C	16,2°C	17,7°C	14,7°C
Mínimo	12,3°C	14,1°C	13,9°C	13,1°C	14,2°C	14,5°C	11,7°C
Máximo	20,1°C	20,7°C	20,8°C	18,9°C	20,2°C	19,8°C	16,2°C
Desviación estándar	1,8°C	1,5°C	1,5°C	1,6°C	1,4°C	1,2°C	1,0°C
Varianza muestral	3,2	2,2	2,3	2,4	1,8	1,4	1,0
No. datos	57	57	57	57	57	57	57

Tabla 4. Gradientes de temperatura calculados para el comportamiento del experimento en la Medición No. 2.

Ec.	Tejado Eternit®				Tejado Español		
	Ref.	Control	Convencional	Con Llanta	Control	Convencional	Con Llanta
	T. Ambiente	16,4°C	16,8°C	16,9°C	16,0°C	17,2°C	16,9°C
1	14,3°C	2,1°C	2,5°C	2,6°C	1,7°C	2,9°C	2,6°C
2	Control	0,4°C	0,5°C	Control	1,2°C	0,9°C	
3	Convencional	0,1°C	Convencional		-0,3°C		

En cuanto al grupo de construcciones de tejado tipo Eternit®, el techo verde convencional alcanzó un valor máximo de temperatura interna de 20,7°C en el mes de octubre y un valor mínimo de 14,1°C en el mes de septiembre, y una desviación de datos tomados de $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ con respecto a su media.

Ahora bien, el techo verde modificado con llantas en el tejado gris registró una temperatura media de 16,9°C, y una máxima y mínima de 20,8 y 13,9°C presentados en los meses de octubre y noviembre respectivamente, siendo 16,2°C la temperatura de mayor frecuencia en los 57 datos analizados.

El tejado tipo español de acuerdo con la Tabla 3, con una desviación de sus datos de $\pm 1,6^{\circ}\text{C}$, registró un valor máximo de temperatura interna de 18,9°C y un valor mínimo de 13,1°C en los meses de septiembre y noviembre respectivamente. El tejado tipo español con banda de llanta registró un máximo de 19,8°C en el mes de octubre, y una temperatura interna mínima de 14,5°C presentada en septiembre.

Al respecto de los gradientes de temperatura calculados, en la Tabla 4 se encuentran resumidos como producto del análisis y graficados en la Figura 8.

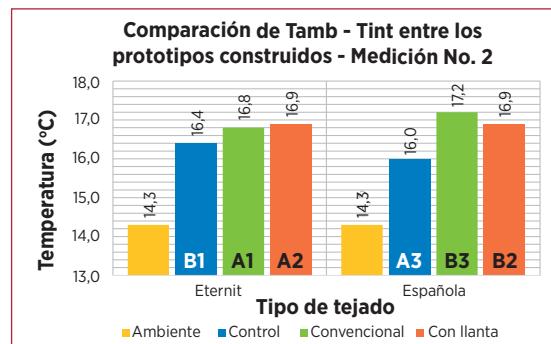


Figura 8. Relación de Temperatura Ambiente vs Temperatura Interna de los prototipos construidos en la medición No. 2.

En la Figura 8 se observa que, al igual que la Medición No. 1, la temperatura interna de cada una de las construcciones durante el día sigue siendo mayor en comparación a la temperatura media ambiente independientemente del tejado y techo usado; ya que presentan un aumento de 2,1°C para el tejado B1 (14,7%), y de 1,7°C (11,8%) para el tejado tipo español (A3).

Valbuena (2013) [16], registró un aumento de aproximadamente 0,1°C (0,3%) la temperatura interna de la vivienda sin techo verde frente a la temperatura ambiente; esta diferencia puede ser debida a que el estudio realizado se llevó a cabo en clima tropical y en tiempo seco. Sin embargo, Jim (2015) [21], determinó que un techo verde podría llegar a estar entre 0,8 y 1,6°C por encima de la temperatura ambiente al ser su estudio en clima húmedo tropical. Además de ello, la construcción de control tipo español muestra estar 2,8% por debajo del tejado Eternit® estudiado, lo que permite mencionar que este último tiene mayores cualidades de retención térmica durante el día en comparación al tejado español.

Para los techos verdes convencionales, y de acuerdo con la Figura 8, se puede resaltar que a diferencia del comportamiento registrado en la Medición No. 1, estos incrementan la temperatura interna de las edificaciones en relación con el sistema de control para cada grupo, puesto que la construcción con techo verde en el tejado A1 alcanzó los 16,8°C en promedio, aumentando 0,4°C (2,4%) la temperatura interna en relación al prototipo B1. Al igual que lo registrado en el tejado tipo español B3, donde el techo verde incrementó la temperatura 1,2°C (7,5%) en comparación a la construcción de control. Estos resultados muestran

ser afines a la literatura, puesto que se plantea que las temperaturas medias de las construcciones de control de acuerdo con Rosatto et al. (2016) [15], podrían representar bajas temperaturas en comparación al techo verde convencional, debido a que su superficie está expuesta directamente al cielo nocturno; mientras que en la superficie del techo verde se encuentra cubierta de plantas.

Finalmente, se determinó una diferencia entre techos verdes convencionales cerca del 2,8% para el tejado B3 sobre el A1 de la misma característica.

Por último, el techo verde modificado con llantas al igual que lo encontrado en la Medición No.1, atenúa la temperatura interna de la edificación cuando se cuenta con el tejado tipo español (B2) y no cuando se trata de tipo Eternit®. Por consiguiente, el tejado B2 atenuó 0,3°C (1,7%) la temperatura interna con respecto al tejado tipo español B3. Por el contrario, el tejado tipo Eternit® A2, incrementó la temperatura 0,1°C (0,6%) en comparación a la regulada por el techo verde convencional (A1). Este último comportándose como lo registrado por Valbuena (2012) [16], citado anteriormente, como si el techo tradicional fuera una construcción de control y la modificación con llanta en los techos verdes, como si fuera un techo verde convencional.

b. Análisis de resultados conjuntos de las dos mediciones

En la Figura 9 se describe la comparación conjunta entre las distintas construcciones en función de las mediciones realizadas para las horas de la mañana (Medición No. 1) y noche (Medición No. 2).

Teniendo en cuenta la definición asignada para cada medición con anterioridad, en la Figura 9, las temperaturas registradas para las horas de la noche, 19:00 horas locales, muestran ser mayores a las registradas en la mañana, que van desde el 3,1% por encima para la construcción A3, hasta una máxima de 12,8% para la construcción B3.

Lo que es coherente conceptualmente de acuerdo con Razzaghmanesh, Beecham, & Salemi (2015) [25], y Cardoso & Vecchia (2012) [11], ya que el comportamiento de la temperatura en una construcción durante el día corresponde al fenómeno de absorción de radiación solar en forma de calor por la edificación, reflejando su acumulación térmica en esta medición. Pero así mismo, esta energía captada es liberada de forma gradual durante la noche [21], disminuyendo así esta temperatura interna hasta alcanzar los niveles registrados en la Medición No. 1.

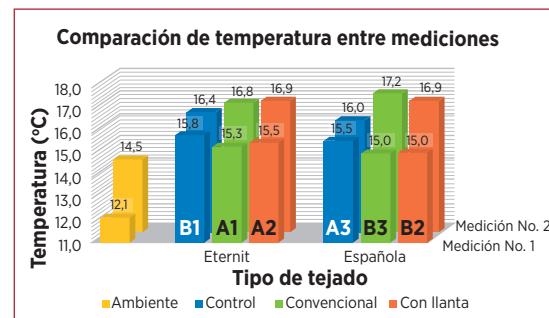


Figura 9. Comparación de temperaturas medias internas registradas en los prototipos construidos para las dos mediciones realizadas.

De esta forma, los techos verdes pueden ser útiles para mitigar el efecto de la isla de calor urbana [12], la causa aproximada de una tercera parte del calentamiento global [24], además de mejorar las condiciones de evapotranspiración en las ciudades

[6] como principal causa de los efectos aislantes del sustrato y la vegetación [26]. Aunque no representan cambios drásticos de la temperatura promedio a lo largo del día, este tipo de sistemas tiene un efecto estabilizador de temperatura en la edificación [15].

En la Tabla 5, se registra que el grupo de construcciones que presenta una mayor

liberación de energía durante la noche corresponde al tejado tipo español con techo verde convencional, con una diferencia de 2,2°C (12,8%). Al igual que lo reflejado para el grupo de tejado tipo Eternit®, donde junto con el techo verde convencional mostró ser la mayor la diferencia durante el día en comparación a la de control y la modificada con llanta, correspondiente a 1,5°C (8,9%).

Tabla 5. Comparación conjunta entre los distintos grupos de construcciones por característica de tejado.

Ítem	Tejado Tipo Eternit			Tejado Tipo Español			Temp. Ambiente
	Control	Conven.	Llanta	Control	Conven.	Llanta	
Diferencia	0,6°C	1,5°C	1,4°C	0,5°C	2,2°C	1,9°C	2,2°C
%	3,7%	8,9%	8,3%	3,1%	12,8%	11,2%	15,4%

Finalmente, de acuerdo con los datos reflejados en la Tabla 5, y el comportamiento mostrado en la Figura 9, se determina que el tejado Eternit® podría tener mayores cualidades aislantes como propiedades del material, ya que tiende a mantener menos fluctuaciones de la temperatura interna de la edificación durante un día completo como aproximación. Condición que le es difícil mantener al tejado español, al mostrar mayor diferencia entre cada medición.

4. Conclusiones

De acuerdo con los resultados analizados para el II Periodo Húmedo del 2016, se determinó que independientemente del tejado manejado en el experimento descrito, teja gris tipo Eternit® y teja de barro tipo española, al igual que el horario de medidas analizado; la temperatura interna media de cada construcción es superior a la temperatura media ambiente en la que

se encuentra el experimento expuesto. Puesto que se determinó un aumento del 30,6% (3,7°C) y 28,1% (3,4°C) para la Medición No 1, y 14,7% (2,1°C) y 11,9% (1,7°C) en la Medida No. 2 para los tejados tipo Eternit® y española respectivamente. De lo anterior, se plantea que el material del tejado tipo Eternit® describe mayores cualidades de absorción térmica, al mostrar la retención del calor interno de la edificación en mayor proporción que lo presentado en el tejado tipo español, correspondiendo al 2,5 y 2,8% de más en comparación a este último. Además de ello, también se demuestra de acuerdo a la proporción de retención en los horarios medidos que, el comportamiento de los tejados durante la noche, registrado en la Medición No. 1, describe una retención mayor de calor que lo descrito en la Medición No. 2; con un 44,6 y 50,8% para el tejado Eternit® y tipo español respectivamente.

Se sustentó cuantitativamente que los techos verdes en la ciudad de Bogotá para

el II Periodo Húmedo del 2016, atenuaron la temperatura interior de la edificación en comparación a la construcción de control, en una proporción de 3,2% (0,5°C) para ambos tipos de tejados. Ahora bien, el tejado tipo Eternit® gris junto con la modificación de su capa de drenaje con llantas desechadas, en vez de mejorar las cualidades aislantes de disminución de temperatura interior con respecto a la exterior, no muestra ser una muy buena alternativa; puesto que en vez de seguir con la tendencia de regulación del techo verde convencional, aumenta la temperatura interna 0,2°C, correspondiente al 1,3% en el interior de la edificación para la medición No. 1, y manteniéndose constante en la medición No. 2. Por lo anterior, si lo que prefiere es instalar un techo verde en una región cálida, resulta ser mejor opción hacerlo en un tejado tipo español, más aún cuando se trata de la modificación de este con caucho de llantas, llegando a reducir hasta el 3,2% en comparación a los tejados sin techos verdes. Comportamiento que hace que el techo verde con llanta instalado en un tejado de fibrocemento gris sea la mejor opción de calentamiento interno en regiones frías por el incremento de hasta el 3,0% en comparación como si la edificación no contara con este tipo de tecnología.

5. Referencias

- [1] ANDI. (10 de junio de 2014). Bogotá ya cuenta con 92 puntos de recolección de llantas usadas. Recuperado el 10 de febrero de 2016, de ANDI: <http://www.ecopunto.com.co/Noticia.aspx?nid=68c895e0-5653-4b34-9c4a-793cf-30bb553>
- [2] Secretaría de Ambiente Mayor de Bogotá. (2011). Resolución No. 6981; Por la cual se dictan lineamientos para el aprovechamiento de llantas y neumáticos usados, y llantas no conforme en el Distrito Capital. Recuperado el 10 de febrero de 2016, de Secretaría de Ambiente: http://www.ecopunto.com.co/content/normas/d90ab2ed7edd4a-2d8e19a425d12770d7_Res_6981_2011_SDA_Llantas_usadas.pdf
- [3] Cámara de Comercio de Bogotá (CCB) & Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente (DAMA). (2006). Guía para el manejo de llantas usadas; Un sector transporte con operación más limpia. Bogotá D.C: Kimpres Ltda. Recuperado el 10 de febrero de 2016, de http://www.ambientebogota.gov.co/c/document_library/get_file?uuid=ab80a611-f997-4864-bd6e-7aa-0d8680067&groupId=10157
- [4] Zárate, C. (2015). Valoración de 3 métodos de reciclaje de llantas para implementar en el municipio de Villavicencio. Trabajo de especialización para optar al título de Planeación ambiental y manejo integral de los recursos naturales. Bogotá, Colombia. Universidad Militar Nueva Granada. Recuperado el 12 de febrero de 2016, de <http://hdl.handle.net/10654/6302>.
- [5] Alcaldía Mayor de Bogotá, Departamento Técnico Administrativo de Medio Ambiente (DAMA), Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), & Organización de Control Ambiental y Desarrollo Empresarial (OCADE). (2012). Diagnóstico ambiental sobre el manejo actual de llantas y neumáticos usados generados por el parque automotor de Santa Fe de Bogotá. Recuperado el 21 de enero de 2016, de Observatorio Rural de Bogotá: <http://ambientebogota.gov.co/documents/10157/0/Llantas.pdf>
- [6] Brudermann, T., & Sangkakool, T. (2016). Green roofs in temperate climate cities in Europe - An analysis of key decision

- factor. *Revista Urban Forestry & Urban Greening*, 21, 224-234. Recuperado el 22 de febrero de 2017, de <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.074>.
- [7] Rincón, L., Coma, J., Pérez, G., Castell, A., Boer, D., & Cabeza, L. (2014). Environmental performance of recycled rubber as drainage layer in extensive green roofs. A comparative Life Cycle Assessment. *Revista Building and Environment*, 74, 22-30. Recuperado el 19 de marzo de 2016, de <http://dx.doi.org/10.1016/j.buidrvn.2014.01.001>
- [8] Ristvey, A., Solano, L., Wharton, K., Cohan, S., & Lea-Cox, J. (2010). Effects of Crumb Rubber Amendments on the Porosity, Water Holding Capacity and Bulk Density of Three Green Roof Substrates. *Revista Low Impact Development* 2010, 889-896. Recuperado el 19 de marzo de 2016, de [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/41099\(367\)78](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/41099(367)78)
- [9] Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R., Doshi, H., Dunnett, N., & Rowe, B. (2013). Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services. *Revista BioScience*, 57 (10), 823-833. Recuperado el 25 de julio de 2016, de <http://dx.doi.org/10.1641/B571005>
- [10] Beltrán, A., Vargas, M., Pérez, A., & García, J. (2014). Confort térmico de techos verdes con *Cissus verticillata* (Vitaceae) en viviendas rurales tropicales. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* (9), 1551-1560. Recuperado el 4 de septiembre de 2015, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=263137781003>
- [11] Cardoso, G., & Vecchia, F. (2012). Thermal behaviour of green roofs applied to tropical climate. *Revista Journal of Construction Engineering*, 1-7. Recuperado el 13 de mayo de 2017, de <http://dx.doi.org/10.1155/2013/940386>.
- [12] Coma, J., Gabriel, P., Solé, C., Castell, A., & Cabeza, L. (2015). Thermal assessment of extensive green roofs as passive tool for energy saving in buildings. *Revista Renewable Energy*, 85, 1106-1115. Recuperado el 22 de febrero de 2017, de <http://dx.doi.org/10.1016/j.ufug.201.12.008>.
- [13] Canales, M. (2014). Efectos del uso de techos verdes y fachadas vegetales en el comportamiento térmico de edificios. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil. Santiago de Chile, Chile. Universidad de Chile. Recuperado el 22 de septiembre de 2016, de <http://www.repositorio.uchile.cl/handle/2250/130298>.
- [14] Zielinski, S., García, M., & Vega, J. (2012). Techos verdes: ¿Una herramienta viable para la gestión ambiental en el sector hotelero del Rodadero, Santa Marta? *Revista Gestión y Ambiente*, 15 (1), 91-104. Recuperado el 4 de septiembre de 2015, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169424101008>
- [15] Rosatto, H., Botta, G., Tolón, A., Tardito, H., & Leveratto, M. (2016). Problemáticas del cambio climático en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires - Aportes de las cubiertas vegetadas en la regulación térmica. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 48 (1), 197-209. Recuperado el 30 enero de 2017, de <http://www.redalyc.org/html/3828/382846012004/>
- [16] Valbuena, M. (2012). Implementación de un modelo de techo verde y su beneficio térmico en un hogar de Honda, Tolima (Colombia). Trabajo de grado para optar el título de Ecólogo. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana. Recuperado el 20 de septiembre de 2016, de <http://repository.javeriana.edu.co>.

- edu.co/bitstream/10554/8985/1/RhodesValbuenaMateode2012.pdf
- [17] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), & Fondo de Prevención y Atención de Emergencias (FOPAE). (2007). Estudio de la caracterización climática de Bogotá y cuenca alta del Río Tunjuelo (Primera ed.). (S.F.). Bogotá D.C, Colombia: Alcaldía Mayor de Bogotá. Recuperado el 21 de enero de 2017, de <http://oab2.ambientebogota.gov.co/es/documentacion-e-investigaciones/resultado-busqueda/estudio-de-la-caracterizacion-climatica-de-bogota-y-cuenca-alta-del-rio-tunjuelo>
- [18] Giraldo, N., & Yamhure, K. (2014). Requerimientos mínimos para la implementación de un techo verde. (I. L. Reyez Gómez, & V. Vanegas Vásquez, Edits.) *Techos Verdes y Jardines Verticales, Una piel natural para Bogotá*, I. Recuperado el 1 de septiembre de 2015, de http://issuu.com/sda2015/docs/gu_a_de_techos_verdes_y_jardines_v_f4988c2a8cc627/27?e=17042598/15028526
- [19] World Meteorological Organization. (1992). Manual on the Global Data-Processing System (1992 ed., Vol. II). Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization. Recuperado el 29 de marzo de 2016, de World Meteorological Organization - Weather Climate Water: https://www.wmo.int/pages/prog/www/DPFS/Manual_GDPFS.html
- [20] Gaisford, S., Kett, V., & Haines, P. (2016). Principles of thermal analysis and calorimetry. Royal society of chemistry. London.
- [21] Jim, C. (2015). Assessing climate-adaptation effect of extensive tropical green roofs in cities. *Revista Landscape and Urban Planning*, 138, 54-70. Recuperado el 13 de abril de 2017, de <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.02.014>.
- [22] 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. *Revista Urban Ecosyst*, 11, 339-348. Recuperado el 22 de febrero de 2017, de <http://dx.doi.org/10.1007/s11252-008-0069-4>
- [23] Collins, S. (2016). Thermal behaviour of Green roofs in winter conditions. Tesis de maestría para optar al título de Maestro en multidisciplinariedad de estudios sobre temas ambientales urbanos. Helsinki, Finlandia.
- [24] Forero, C., & Devia, C. (2011). Mejora de las condiciones de habitabilidad y del cambio climático a partir de eco-techos extensivos. Estudio de caso: barrio La Isla, Altos de Cazucá, Soacha, Cundinamarca. *Revista Cuadernos de vivienda y urbanismo*, 4 (8), 316-329. Recuperado el 26 de agosto de 2016, de <http://revistas.javeriana.edu.co/index.php/cvyu/article/view/5578>
- [25] Razzaghmanesh, M., Beecham, S., & Salemi, T. (2015). The role of Green roofs in mitigating urban heat island effects in the metropolitan área of Adelaide, South Australia. *Revista Urban Forestry & Urban Greening*, 15, 89-102. Recuperado el 13 de mayo de 2017, de <http://dx.doi.org/10.1016/j.ufug.2015.11.013>.
- [26] Coutts, A., Daly, E., Beringer, J., & Tapper, N. (2013). Assessing practical measures to reduce urban heat: Green and cool roofs. *Revista Building and Environment*, 70, 266-276. Recuperado el 13 de abril de 2017, de <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.08.021>.