

Análisis experimental térmico entre jardines verticales y otros materiales empleados para construcción en Bogotá

Experimental Thermal Analysis between Vertical Gardens and other materials used for Construction in Bogota

Néstor Daniel García Serrano¹ Johanna Monsalve Jiménez² Juan Antonio Aragón Moreno³

¹ Universidad Libre, Bogotá, Colombia, danielgarcia312@gmail.com

² Universidad Libre, Bogotá, Colombia, johanna-monsalvej@unilibre.edu.co

³ ORCID: 0000-0003-2768-9082, Universidad Libre, Bogotá, Colombia, juan.aragonm@unilibre.edu.co

Fecha de recepción: 27/01/2020 - Fecha de aceptación del artículo: 26/02/2020



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No comercial-SinObraDerivada 4.0 internacional.

DOI: [10.18041/1794-4953/avances.15935](https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.15935)

Como citar: Como citar Monsalve Jiménez, J., García Serrano, N., & Aragón Moreno, J. (2020). Análisis experimental térmico entre jardines verticales y otros materiales empleados para construcción en Bogotá. *Avances: Investigación En Ingeniería*, 17(1). <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.15935>

Resumen

Este artículo se enfoca en cómo los jardines verticales en las estructuras en el interior de las ciudades disminuyen la temperatura, ya que el desarrollo urbano y la baja presencia de coberturas vegetales, genera una intensificación de las islas de calor urbano. De ahí que el uso de fachadas verdes se considere una herramienta para mitigar el calor urbano, debido a que funciona como un aislante térmico natural y adquiere una mayor relevancia después de haber acumulado la mayor cantidad de radiación. La metodología empleada fue la del análisis térmico diferencial (DTA), una técnica simple y muy utilizada que compara la temperatura entre dos muestras, como el ladrillo y el jardín vertical. Así, se buscó determinar la hora del día en la que es más evidente el cambio de temperatura y en qué temporada (seca o húmeda) el jardín desempeñaría un papel más notorio. Con la investigación se evidenciaron diferenciales térmicos que podrían indicar si el jardín vertical es o no una medida de mitigación para el efecto isla de calor urbano y en qué temporada es más efectivo.

Palabras clave: isla de calor, jardines verticales, mitigación, temperatura, temporada, análisis térmico.

Abstract

This article focuses on the decrease in temperature provided by vertical gardens since urban development and the low presence of plant cover generate an intensification of urban heat islands. Thus, the use of green facades as a tool for urban heat mitigation because it functions as a natural thermal insulator and acquires greater relevance after having accumulated more radiation. The methodology used in this paper was Differential Thermal Analysis (DTA), it is a simple and widely used technique, which compares the temperature between two samples such as brick and vertical garden. Thus, this study aimed to determine the time of day in which the change of temperature is most evident and in which season (dry or wet) the garden might play a more remarkable role. This investigation shows thermal differentials that could indicate whether the vertical garden is a mitigation measure for the urban heat island effect, and in which season it may be more effective.

Keywords: heat island, vertical gardens, mitigation, temperature, season and thermal analysis.

Introducción

La degradación ambiental que se está experimentando hoy en día por la expansión de las grandes urbes ha causado que las zonas verdes se hayan remplazado por un recubrimiento de cemento, que provoca acumulación de calor [1], [2]. Este fenómeno está estrechamente relacionado con la alta densidad de las construcciones, especialmente la de los edificios, la alta absorbancia de los materiales que son empleados en las ciudades, la falta de zonas verdes, las características morfológicas de los cañones urbanos y el calor antropogénico liberado [3]-[5].

En efecto, a medida que las áreas urbanas se desarrollan, la construcción de edificios, carreteras y otras infraestructuras se vuelven indispensables para dar una “mayor calidad de vida”; pero esto trae consigo que estas construcciones remplacen la tierra y la vegetación. Así, las superficies que antes eran permeables y húmedas se convierten en superficies impermeables y secas. En consecuencia, se generan drásticos daños en zonas donde el desarrollo urbano es mayor, pues cada vez son más cálidas que en entornos rurales más cercanos. Forman así una isla de calor urbano (ICU) [6].

Es importante precisar que hace apenas un siglo el 14% de la población mundial se encontraba ubicada en ciudades o urbes medianas [7]. Ahora estas poblaciones alcanzan el 55%, y en algunos países desarrollados estas zonas se encuentran pobladas entre un 70 y un 80% [8]. El crecimiento poblacional está aumentando en una tasa media anual del 1%; mientras que el crecimiento urbano está cercano al 2% anual [9].

En cuanto al análisis de la ICU, se basa en el estudio de la temperatura emitida por la superficie. El método más aplicado ha sido el uso de imágenes de satélite que permiten determinar el desplazamiento a largo plazo de este fenómeno en las ciudades [10]. Ciertamente, las ICU atmosféricas son más débiles durante el día y se vuelven más intensas en la noche, puesto que la infraestructura urbana libera lentamente la acumulación del calor que absorbe a lo largo del día [2].

La temperatura media anual en una ciudad con un promedio de un millón de habitantes está entre 1 y 3°C más cálida que en su entorno, y las áreas boscosas pueden llegar a ser hasta 5,5°C más frías que las urbanas [11], [12]; sin embargo, en una noche clara la diferencia puede llegar a ser hasta de 12°C [13].

De igual manera, un estudio realizado en Manchester, Reino Unido, mostró recientes mediciones de presencia de una ICU máxima en verano de 8°C [14]. Se trata de la modelación en una casa que indicó un aumento de 3°C en la temperatura interna para un modesto efecto de la isla de calor de 5°C con un aumento del 60% para el año 2050. Esto evidencia el sobrecalentamiento en verano.

En ese mismo sentido, un estudio realizado en la ciudad de Mexicali [15], enfocado en mediciones de la temperatura del aire, análisis de la isla de calor atmosférica (como la superficial) y su relación con los usos del suelo confirmó la existencia de una ICU superficial, al identificar importantes contrastes térmicos en el interior de la ciudad y el desarrollo de una isla de calor nocturna. Los mayores contrastes térmicos observados en este mismo estudio son de valores superiores a los 40°C entre el área urbana y el área rural circundante, en los meses de julio y agosto.

Por otro lado, en la ciudad de Bahía Blanca, Argentina, se menciona la distribución de la ICU. Allí se evidencia que en verano la ciudad se muestra más fresca que el área circundante, lo que da lugar a una “isla fría”, puesto que en la noche la ciudad presenta temperaturas más altas que los sectores rurales o costeros próximos. Este efecto genera una intensidad instantánea de la isla cálida de 7 °C [16], [17]. No obstante, se insiste en que en invierno el comportamiento es diferente: la ciudad genera en el día una pequeña isla de calor, y en la noche, la distribución de temperatura responde a los resultados teóricos de la isla de calor, siendo el centro de la ciudad más cálido que el área rural [18].

De forma similar, en un estudio realizado en Santiago de Chile se comprobó que ese fenómeno se presenta durante la noche, al observarse diferencias de 3 a 4 °C entre el centro de la ciudad y los barrios laterales; además, se logran diferencias nocturnas de temperatura mayores a 10 °C entre el centro y el entorno suburbano de la ciudad de Santiago [19], [20]. Acorde con los estudios nombrados, los efectos de este fenómeno en un día caluroso pueden llegar a ser datos de temperatura del techo y del pavimento entre 27 y 50 °C más altas que las del aire; mientras que las superficies sombreadas, que en este caso se encuentran en las zonas rurales, están muy cercanas a la temperatura media del aire [21].

A lo anterior es importante agregarle que, en el verano, estas ICU presentan varios impactos que contribuyen acrecentar este fenómeno, pues la temperatura de las ciudades, después de que el sol ya se ha ido, puede llegar a ser de 12 °C más, en comparación con las regiones cercanas menos desarrolladas [21].

Colombia no escapa a este fenómeno. El estudio de [22] reevalúa las tendencias de largo plazo, observadas durante la segunda mitad del siglo XX en la temperatura del aire, las cuales mencionaban que la precipitación de eventos extremos de temperatura del aire y de lluvia a finales del siglo XXI concluían que la temperatura media en Colombia aumentaría de 3 a 4 °C.

Así mismo, en el 2010, en Bogotá, se desarrolló un estudio sobre los cambios en la temperatura media, mínima y máxima, que demostró cómo durante los últimos 40 años se ha formado en el centro de la ciudad una ICU que se ha expandido hasta el norte y supera en cerca de 3 °C la temperatura media de la periferia [23].

En cuanto a los muros verdes, que forman parte de la construcción bioclimática, brindan una opción a esta problemática, gracias a la incorporación de diversos materiales que permiten absorber y acumular calor durante el día para luego ser liberado durante la noche [13].

En un estudio realizado por Poza y Feijó [24], la presencia de la vegetación puede llegar a reducir la temperatura ambiental entre 1 y 5 °C. Ello constituye una protección frente a la acumulación de calor excesivo proveniente por los rayos solares. Dicha vegetación puede filtrar y obstruir dicha radiación. Un estudio similar en Cartagena, Colombia, afirmaba que los materiales o las coberturas vegetadas ofrecían un aislamiento superior frente a estructuras realizadas exclusivamente con madera o piedra [25].

El efecto de la ICU se puede ver atenuado por la inserción de coberturas vegetadas (por ejemplo, azoteas frescas) que utilizan materiales con dos importantes propiedades: un albedo alto y una emitancia térmica [26].

En cuanto a las azoteas verdes y reflexivas, estas se refieren al tratamiento mediante el cual se crea una cubierta vegetal a una edificación, que proporciona sombra y disminuye la temperatura del aire circundante a través de la evapotranspiración; además de reducir la carga térmica de la edificación. Incluso se estima que si la radiación solar absorbida por pavimentos y estacionamientos se reduce de un 90 a un 65 %, la temperatura máxima del aire puede reducirse hasta en 18 °C, en Mexicali [26].

En general, los materiales empleados en la construcción de estructuras tienen una mayor capacidad térmica que los materiales usados para la construcción de coberturas vegetales [27].

Al respecto, es conveniente decir que algunos casos reales demuestran la garantía del uso de jardines verticales; por ejemplo: un estudio en Tokio demostró que la temperatura media del día mejoró en 0,47 °C, como resultado de enverdecer las áreas de Tokio alrededor de un edificio. En síntesis, la vegetación reduce la temperatura del material, su emisividad de infrarrojo por absorción solar y el enfriamiento evaporativo [28].

En ese mismo contexto, Acosta y Merino [29], en la ciudad de Madrid (España), demostraron que el uso de hiedra de Boston y plantas trepadoras en las fachadas de los edificios puede modificar la relación e interacción de los edificios y la atmósfera; al igual que mejorar el ambiente tanto interior como exterior de las estructuras que cuentan con estas coberturas vegetadas hasta en un 25%. Así mismo, la reforestación urbana contribuye a mitigar la isla de calor, al variar las condiciones microclimáticas en espacios abiertos, al regular la temperatura y humedad, y al mejorar la calidad del aire con la captura de dióxido de carbono [30].

En cuanto a la construcción de jardines verticales, se tuvieron en cuenta las recomendaciones de la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá [31], que sugiere la especie *Sedum*, un género que pertenece al grupo de las Suculentas, originarias de Europa y México; pertenece a la familia Crassulaceae, comprende muchas especies, son carnosos tanto los tallos como las hojas y tienen la función de almacenar agua. Estas plantas se destacan por ser muy adaptadas a la sequía, debido a la capacidad de almacenar agua en sus hojas. Su tamaño varía entre especies que no sobrepasan los 10 o 12 cm y soportan sequías estacionales y otras condiciones adversas. Probablemente, son los reservorios vivos de agua más importantes del planeta [32].

Así mismo, estas especies de plantas aportan al control pasivo del clima. Esto se debe a dos efectos distintos: por un lado, el aislamiento y protección de la radiación solar, junto a su acción como evaporadores naturales que transforman el calor sensible circundante en calor latente. Por otro, las plantas pueden emplearse en el exterior de los edificios en las cubiertas y fachadas con enredaderas, jardines verticales, fachadas vegetales, entre otros.

Aunado a esto, al comprobar la eficacia y veracidad de estos estudios, para esta investigación se propuso una técnica que se basa en el análisis térmico diferencial (DTA, por sus siglas en

inglés), que compara la diferencia de temperatura entre la muestra y un material de referencia, sometidos al mismo programa de calentamiento [33].

En cuanto al análisis empleado en la experimentación, el DTA es una técnica de análisis térmico muy utilizado para medir las transiciones endotérmicas y exotérmicas en función de la temperatura.

De manera análoga, con esta técnica se quiso determinar a qué hora del día era más evidente el cambio de temperatura y que material tenía mayor tendencia a acumular energía; adicionalmente, se pretendía establecer en qué temporada, si húmeda o seca, un jardín vertical desempeña un papel más notorio e importante. Esto se puede observar en la ecuación (1):

$$\Delta T = T_r - T_s \quad (1)$$

No parece excesivo afirmar que el efecto de las ICU debe sugerir alternativas de urgencia para refrenar las consecuencias al medio ambiente. Por ello, el uso del jardín vertical ofrece numerosos beneficios, como purificar el aire, reducir la temperatura ambiente y promover la biodiversidad en la ciudad, como los que se buscan en este estudio.

1. Metodología propuesta

Este proyecto tiene un enfoque experimental, debido a la técnica que se emplea (termografía), que permite determinar temperaturas a distancia y sin necesidad de contacto físico con el objeto que se va a estudiar. La construcción del jardín vertical se realizó en el interior de la Universidad Libre, sede Bosque, en el bloque B. El área que se utilizó para la construcción del jardín vertical fue de 2,3 m × 1,8 m. Para iniciar el montaje del jardín se necesitó:

- ◆ Un foam board (Ver fig, figura 1): de 5 mm de espesor.
- ◆ Una 1 polisombra geotextil con 920 bolsillos.
- ◆ 920 plantas: Especie *Sedum reflexum* (552), *Blue spruce* (46), *Sedum rupestre* (138), y *Sedum tripmadam* (184).
- ◆ Gancho industriales: 4600.
- ◆ Chazos y tornillos: 21.
- ◆ Sustrato (hojas secas, melaza y residuos de café).



Figura 1. Inicio de la construcción del jardín vertical

1.1. Instrumentos para medir la temperatura

Un termómetro infrarrojo (ver figura 2) con las siguientes características:

- ◆ Emisividad ajustable de 0,10 ~1,0.
- ◆ Rango- de 50 °C a 1000 °C.
- ◆ Tiempo de respuesta: menos de 1 segundo.
- ◆ Exactitud básica: $\pm 1,5\%$ de lectura o ± 2 °C.



Figura 2. Termómetro láser IR EIR-1000

Estación meteorológica automática Davis Vantage Pro 2 Plus con una precisión de $\pm 0,5$ °C (figura 3).



Figura 3. Estación meteorológica Davis Vantage Pro 2 semiautomática

1.2. Método de construcción

A continuación, se inicia la construcción del jardín asegurando el foamboard con tornillos y chazos (figura 4).



Figura 4. Inicio del montaje con foamboard

Después el foamboard se recubrió con la polisombra geotextil para dibujar el diseño que tendría el jardín, de acuerdo con lo sugerido por Cabrera y Salazar [34], para así recubrir con una fachada verde compuesta por bolsillos donde estarán ubicadas las plántulas (figura 5).



Figura 5. Relleno de la zona superior con plántulas

1.3. Método de medición

La técnica utilizada es la termografía, que permite captar la radiación infrarroja del espectro electromagnético utilizando un termómetro láser de contacto en el jardín vertical y en el ladrillo. Ello nos arrojó los datos de temperatura para luego compararlos con la temperatura ambiente. Cada semana se descargaban los datos de la estación meteorológica, a fin de encontrar un dato promedio que nos indicara cuánto disminuye la temperatura en el muro donde está instalado el jardín vertical.

La recolección de estos datos se llevó a cabo durante 6 meses consecutivos entre el 2018 y el 2019, de lunes a sábado. Los meses analizados corresponden a las temporadas húmeda y seca, según información obtenida del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), que estipula que para Bogotá la temporada seca son los meses correspondientes a diciembre, enero y febrero, y para la temporada húmeda: octubre, noviembre y marzo.

En cuanto a las horas de toma de datos, se siguieron los lineamientos dados por la Organización Mundial Meteorológica [35], en el modelo de datos de temperatura planteado en el Manual de procesamiento de datos globales, clasificados por regiones, correspondiente a Suramérica, del cual hace parte Colombia. En el manual se establecen como horas estándar de observación principal de datos meteorológicos 00:00, 06:00, 12:00 y 18:00 UTC (Coordinated Universal Time), que representan 19:00, 1:00, 7:00 y 13:00 horas colombianas, respectivamente. En este proyecto se adoptó la toma de datos a las 7:00 y a las 19:00 horas locales. Así se determinó y se fijó una temperatura promedio en los dos tipos de materiales (ladrillo y jardín vertical).

1.4. Descripción estadística

Con los datos de temperatura tomados con el termómetro láser y descargados de la estación meteorológica, se describieron las medidas de tendencia central, de distribución normal, media, mediana, moda, desviación estándar y varianza, además de sobresaltar los máximos y los mínimos valores de temperatura registrados en el periodo referenciado, parámetros esenciales para analizar esta distribución normal. En este estudio corresponde al comportamiento característico de la suma diaria de los valores de la temperatura, con el fin de obtener en qué temporada (seca o húmeda) disminuye más, puesto que los valores diarios pueden exhibir notables asimetrías, pero convencionalmente la temperatura diaria es aproximadamente el promedio de las máximas y mínimas registradas.

1.5. Análisis térmico diferencial

A fin de establecer la diferencia real entre los materiales de estudio, se usaron tres ecuaciones que correlacionaron los materiales entre sí:

$$\Delta T_{\text{ladrillo}} = T_{\text{ladrillo}} - T_{\text{ambiente}} \quad (2)$$

$$\Delta T_{\text{jardín}} = T_{\text{jardín}} - T_{\text{ambiente}} \quad (3)$$

$$\Delta T_{\text{ladrillo}} = T_{\text{ladrillo}} - T_{\text{jardín}} \quad (4)$$

2. Análisis y resultados

En relación con las mediciones totales realizadas en las temporadas húmeda y seca, se registraron un total de 148 datos de temperatura en la medida de las 7:00, y 122 a las 19:00. Se resalta que se registraron menos datos en esta última, por motivos netamente logísticos de la universidad, debido a que cierra los fines de semana y festivos, y los sábados desde las 12:00 m. Por ello fue imposible obtener el registro de estas horas.

En los datos recolectados, en la temperatura de las 7:00 se observa un comportamiento homogéneo en casi toda la medición; además, se registran mínimos de temperatura ambiente

en diciembre, alcanzando una diferencia de hasta $7,3^{\circ}\text{C}$ respecto al ladrillo, y $5,5^{\circ}\text{C}$ respecto al jardín vertical. También se evidencia el pico más alto de temperatura en noviembre (figura 6).

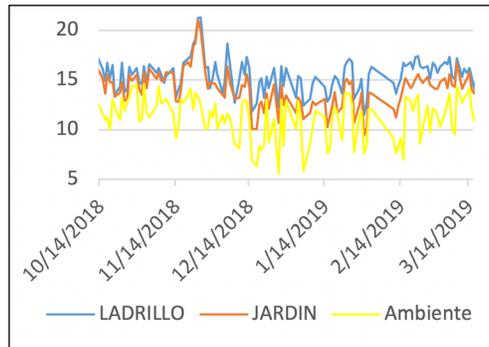


Figura 6. Temperatura a las 7:00 ($^{\circ}\text{C}$)

Como se evidencia, la temperatura del ladrillo a lo largo del estudio siempre estuvo por encima del otro material analizado; sin embargo, la diferencia de temperatura es mucho más notoria en la medición de la tarde (figura 7), comportamiento mostrado de igual forma en los estudios realizados por [3]-[6], donde los autores también corroboraron este comportamiento de mayor temperatura en esas horas.

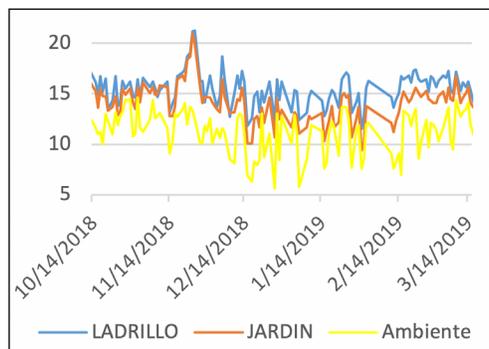


Figura 7. Temperatura a las 19:00 ($^{\circ}\text{C}$)

Según autores como Oki [13], Naciones Unidas [2], Sarricolea y Martín Vide [20], entre otros, el ladrillo, utilizado para la elaboración de infraestructuras, libera el calor acumulado absorbido durante todo el día. De igual forma, esta diferencia térmica entre los materiales de estudio se enlaza con la idea expuesta en el “World Urbanization Propects” [7], donde se afirma que las ICU son más visibles en estructuras hechas con materiales comunes, como el ladrillo o el cemento, que es la situación predominante en este estudio. En la tabla 1 se describen estadísticamente los datos de temperatura tomados en campo a las 7:00 horas.

Tabla 1. Dato de medición a las 7:00 ($^{\circ}\text{C}$)

	Ladrillo	Jardín	Ambiente
Media	15,47	14,03	11,34
Error típico	0,12	0,14	0,16
Mediana	15,4	14,2	11,65
Moda	16,2	14,7	12,8
Desviación estándar	1,56	1,75	1,98

	Ladrillo	Jardín	Ambiente
Mínimo	11,5	9,4	5,6
Máximo	21,3	21	14,6
Cuenta	148	148	148

Durante el periodo de estudio, en horas de la mañana se registró una media de 15,47 °C, siendo el ladrillo el material, en promedio, con mayor temperatura, por encima de los demás materiales de estudio, con un máximo de temperatura registrado de 21,3 °C en noviembre y un mínimo de temperatura reportado en enero, de 11,5 °C. Por otro lado, el comportamiento del jardín, en general, estuvo 1,5 °C por debajo de la temperatura promedio registrada por el ladrillo; además, el jardín vertical registró temperaturas máximas de 21 °C y mínimos de 9,4 °C en noviembre y enero, respectivamente. Tales datos se correlacionan con los estudios [8], [9], que afirman que en diferentes partes del mundo las coberturas vegetadas obtenían menores temperaturas que los materiales comúnmente usados en la construcción.

En la tabla 2 describen estadísticamente los datos de temperatura tomados en campo a las 19:00 horas.

Tabla 2. Datos de medición a las 19:00 (°C)

	Ladrillo	Jardín	Ambiente
Media	20,12	16,44	14,89
Error típico	0,13	0,07	0,08
Mediana	20,15	16,4	15
Moda	21,4	16,1	15
Desviación estándar	1,46	0,83	0,96
Mínimo	16,3	14,1	11,9
Máximo	22,8	19,1	16,8
Cuenta	122	122	122

En este segundo momento se observó que sin importar si el material es de ladrillo o un jardín vertical, la temperatura siempre estará por encima de la registrada por el ambiente. Esto va de acuerdo con los estudios realizados por [10], [36], que demostraron, por medio de herramientas SIG, que el fenómeno de isla de calor se da en ciudades con poca cobertura vegetal y con una infraestructura más desarrollada.

Por otro lado, el análisis estadístico de las mediciones de las 19:00 horas confirma que es más evidente el aumento de temperatura de los materiales de estudio en la medición de la tarde. Ello pone de presente un aumento de hasta 4,6 °C en el ladrillo y de 2 °C para el jardín. Este fue un resultado similar al de Poza y Feijó [24], quienes obtuvieron diferenciales de temperatura entre 1 y 5 °C. Además, el jardín vertical registró una mínima de 16,3 °C en noviembre y una máxima de 22,8 °C en febrero. Pero obtuvo en las medidas de la noche una media de 16,4 °C, es decir, registró una temperatura promedio casi 4 °C menor que la del ladrillo. Se hace hincapié en que la diferencia de temperatura en la medición de la mañana fue de 1,5 °C entre el ladrillo y el jardín, comportamiento muy similar a realizado por Akbari [28] en Tokio, entre 0,5 y 1,5 °C.

El jardín obtuvo, de igual manera, un máximo de temperatura de 19,1°C, y un mínimo de 14,1°C en noviembre.

2.1. Descripción por temporadas

En las figuras correspondientes se contemplaron los datos obtenidos en la mañana y en la tarde según fuera la temporada húmeda (octubre, noviembre y marzo) o la seca (diciembre, enero y febrero). Según el Ideam, para Bogotá los meses con los cuales realizamos el estudio son los correspondientes a dichas temporadas.

En la figura 8 se evidencia que el jardín tiene un comportamiento similar al del ladrillo. En el ambiente, por el contrario, la temperatura es inferior a los demás. Se puede observar casi una similitud a lo largo de la medición, a diferencia de unos picos noviembre; sin embargo, en sí es similar en toda su extensión.

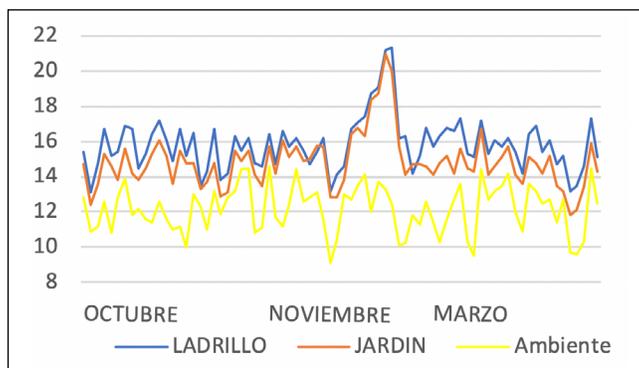


Figura 8. Temporada húmeda a las 7:00 (°C)

En la temporada seca (figura 9), si bien se registró casi el mismo comportamiento que en la figura 8, es más evidente la diferencia de temperatura, y el comportamiento del jardín ya toma un poco de distancia respecto a la figura anterior, ya que se pueden observar diferencias notorias de temperatura entre el ladrillo y el jardín vertical en los meses de enero y febrero.

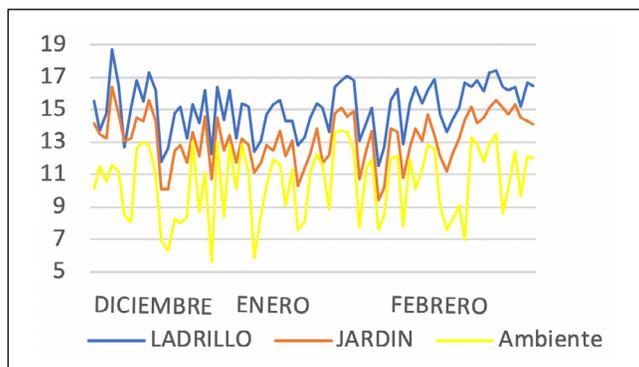


Figura 9. Temporada seca a las 7:00 (°C)

No obstante, en temporada húmeda el diferencial entre el ladrillo y el jardín es solo de 1°C. El ladrillo tuvo un mínimo de 13,1°C y un máximo de 21,3°C. Si bien los datos están cercanos entre sí, el ladrillo siempre será el material que más energía acumule (tabla 3).

Tabla 3. Datos por temporada húmeda a las 7:00 (°C)

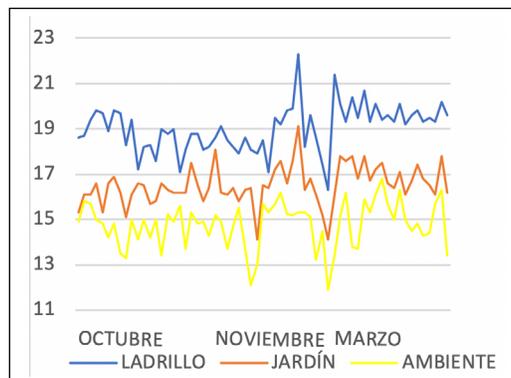
	Ladrillo	Jardín	Ambiente
Media	15,81	14,84	12,16
Error típico	0,17	0,17	0,15
Mediana	15,7	14,75	12,45
Desviación estándar	1,50	1,54	1,35
Mínimo	13,1	11,8	9,1
Máximo	21,3	21	14,6
Cuenta	76	76	76

Los datos obtenidos en temporada seca reflejan una diferencia, en promedio, de casi 2°C entre el ladrillo y el jardín, y de casi 5°C entre la temperatura promedio del ambiente registrada y el ladrillo. Por otro lado, el jardín vertical, si bien está 2,7°C por encima de la temperatura del ambiente, sigue muy por debajo del ladrillo (tabla 4). Este comportamiento tiene sentido si se toman en consideración los datos obtenidos en el estudio realizado por Poza y Feijó [24], en el que se afirmó que los jardines verticales funcionan como una protección de las estructuras de la radiación excesiva proveniente del sol y que se presenta con mayor intensidad en esta época del año en Colombia.

Tabla 4. Datos por temporada seca a las 7:00(°C)

	Ladrillo	Jardín	Ambiente
Media	15,11	13,18	10,48
Error típico	0,18	0,18	0,25
Mediana	15,3	13,3	11,1
Desviación estándar	1,55	1,55	2,18
Mínimo	11,5	9,4	5,6
Máximo	18,7	16,4	13,7
Cuenta	72	72	72

La figura 10 muestra un comportamiento muy claro: el ladrillo es el material que tiene mayor temperatura, seguido del jardín vertical y de la temperatura de ambiente. Se observan picos de temperatura en noviembre y diferenciales importantes entre el ladrillo y el jardín vertical en el mes de marzo.

**Figura 10.** Temporada húmeda a las 19:00 (°C)

Si bien el comportamiento es el mismo, los diferenciales no, dado que en temporada húmeda el jardín está casi que en la mitad de los demás objetos de estudio, siendo el ladrillo el que está por encima de los tres. Dicha afirmación está demostrada en el estudio de Lee y Levermore [14], el cual afirma que el diferencial térmico de este tipo de materiales es más evidente en la tarde, debido a que el material estuvo más expuesto a la radiación a lo largo del día.

Como se ha mencionado, el cambio es más evidente está en la tarde, aunque en temporada seca se aprecia de forma muy clara el diferencial térmico que hay entre cada material de estudio (figura 11).

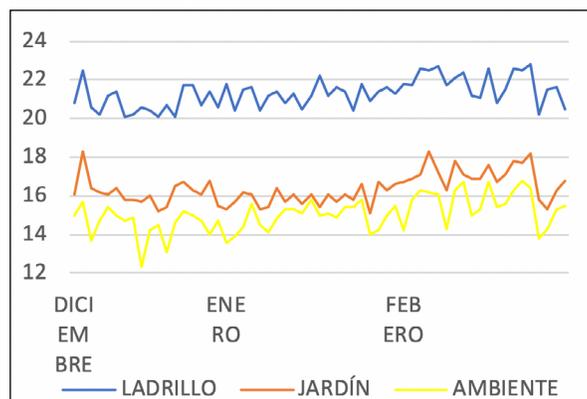


Figura 11. Temporada seca a las 19:00 (°C)

Como resultado, según las figuras presentadas hasta el momento, el jardín vertical adquiere su mayor importancia en épocas secas, cuando la radiación solar es mayor y la humedad del ambiente es escasa, debido a que la radiación golpea más fuerte y, por lo tanto, la propiedad aislante del jardín desempeña un papel más importante. Este comportamiento es muy similar al descrito por Cueto et al. [15], quienes en su estudio en México para los meses de julio y agosto (meses de verano en México) se registraron los mayores contrastes térmicos.

Ahora bien, en la figura 11 se destaca un diferencial mucho más notorio que en los demás: si bien el ladrillo sigue por encima de los demás materiales de estudio, el jardín por el contrario tiende a una temperatura similar a la del ambiente, por lo cual no acumula tanta radiación a lo largo del tiempo. El estudio de Kaiser y Köhler [37] afirma que la implementación de coberturas vegetadas como aislantes térmicos controla el efecto isla de calor.

En la tabla 5 podemos observar diferenciales de hasta 2°C entre el ladrillo y el jardín vertical. En contraste con esto, a lo largo de la medición la temperatura estuvo similar, y la mayoría de los datos estuvieron casi en el mismo rango de 19,2, 16,4 y 15°C para el ladrillo, el jardín y el ambiente, respectivamente.

Tabla 5. Datos por temporada húmeda a las 19:00 (°C)

	Ladrillo	Jardín	Ambiente
Media	19,02	16,51	14,77
Error típico	0,13	0,10	0,12
Mediana	19,2	16,4	15
Desviación estándar	1,03	0,86	1,00

	Ladrillo	Jardín	Ambiente
Mínimo	16,3	14,1	11,9
Máximo	22,3	19,1	16,8
Cuenta	63	63	63

Como es expuesto en la tabla 5, los datos arrojan la evidencia de un diferencial en la media de hasta 2,5°C entre el ladrillo y el jardín, y de 4,3°C entre el ladrillo y el ambiente; además, se puede ver que a lo largo de la medición en la temporada húmeda los datos estuvieron muy similares: variaron en 1°C, por lo general, en los 3 materiales de estudio.

Finalmente, se pueden observar diferenciales en promedio de hasta 5°C entre el ladrillo y el jardín; de 6,3°C entre el ladrillo y el ambiente, como se observa en la tabla 6.

Tabla 6. Datos por temporada seca a las 19:00 (°C)

	Ladrillo	Jardín	Ambiente
Media	21,31	16,37	15,02
Error típico	0,09	0,10	0,11
Mediana	21,4	16,3	15
Desviación estándar	0,76	0,79	0,90
Mínimo	20,1	15,1	12,3
Máximo	22,8	18,3	16,8
Cuenta	59	59	59

Por otra parte, el jardín arroja un diferencial térmico de solo 1,3°C con el ambiente, siendo la temperatura muy similar; además, los máximos y los mínimos observados en esta temporada de toma de datos tuvieron diferenciales de hasta 5°C de entre los materiales.

2.2. Descripción por diferenciales

En las figuras correspondientes se puede observar que el material más cálido siempre es el ladrillo [3]; no obstante, podemos determinar que en la mañana el comportamiento del ladrillo y del jardín es muy similar, debido a que el diferencial térmico es menor; sin embargo, pese a ello, la temperatura del ladrillo alcanza a estar hasta 4°C grados por encima del ambiente y es mayor que el diferencial del jardín y el ambiente (figura 12).

Este fenómeno se debe a que el jardín vertical acumula menos radiación que el ladrillo [10], [11].

El comportamiento del jardín se asemeja más al del ambiente y el diferencial térmico entre el ladrillo y el jardín es más alto que en el anterior (figura 13).

En adición, el comportamiento del jardín se asemeja al del ambiente. Esto se puede observar en la figura 13, debido a que el diferencial de temperatura entre estos dos materiales es el más bajo de todos; por otro lado, el diferencial entre el ladrillo y el jardín es muy alto, casi que igual al de la comparación entre el ladrillo y el ambiente.

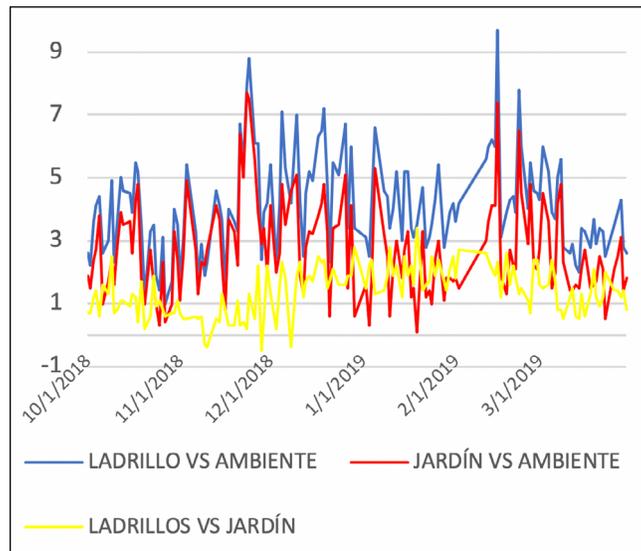


Figura 12. Diferencial térmico a las 7:00 (°C)

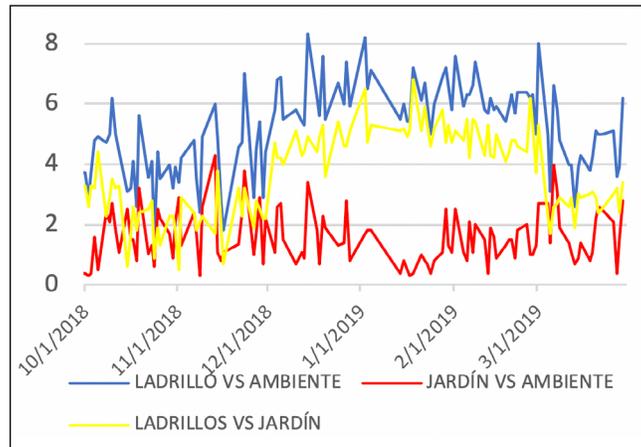


Figura 13. Diferencial térmico a las 19:00 (°C)

Este comportamiento es muy lógico si se tienen en cuenta los estudios ya mencionados ([2], [13], [14], [16], [17]), que relacionan la absorción de los materiales en la incidencia de aumento de temperatura en zonas mayormente pobladas y que se hacen más evidentes en la tarde.

El diferencial de temperatura entre el ladrillo y el ambiente es en promedio de 4,1°C siendo el más alto de las 3 comparaciones (tabla 7).

Tabla 7. Diferencial térmico a las 7:00 (°C)

	Ladrillo vs. ambiente	Jardín vs. ambiente	Jardín vs. ladrillo
ΔT	4,12	2,69	1,43

Este tipo de comportamiento es similar a uno ya mencionado [6], que indicaba el comportamiento de absorción de energía por parte de estos materiales. Además, se presentó un máximo diferencial de temperatura de 9,7°C en febrero y un mínimo de 1°C en octubre. Por otra parte, el diferencial entre el jardín y el ambiente tuvo una media de 2,6°C, es decir, 1,5°C menor que el ladrillo y el ambiente, aparte de que obtuvo un mínimo de 0,1°C y un máximo de 7,7°C en los meses de enero y noviembre, respectivamente.

Por otro lado, el comportamiento del diferencial térmico entre el ladrillo y el jardín, si bien es menor al de los nombrados, existe una diferencia de al menos 1,5°C entre cada material, con un máximo de 3,5°C en febrero y un mínimo de 0,2°C en octubre, noviembre y diciembre. Este comportamiento coincide con lo dicho por Hernández et al. [25].

Definitivamente, la dinámica del material cambia en las medidas de las noches (tabla 8), por lo cual se puede suponer que los materiales no absorben energía de forma similar y, por ende, su temperatura siempre va a ser distinta [13], [20].

Tabla 8. Diferencial térmico a las 19:00 (°C)

	Ladrillo vs. ambiente	Jardín vs. ambiente	Jardín vs. ladrillo
Media	5,22	1,55	3,68

Indiscutiblemente, el diferencial entre el ladrillo y el ambiente, en promedio, es de 5,2°C; del jardín y el ambiente es de 1,5°C, y del jardín y el ladrillo es de 3,65°C.

Se debe agregar que el diferencial de temperatura máximo entre el ladrillo y el ambiente fue de 8,3°C, y el mínimo, de 1,5°C en diciembre y octubre, respectivamente. Por otro lado, el máximo y mínimo gradiente de temperatura entre el jardín y el ambiente fue de 4,3°C en noviembre y de 0,3°C en octubre, noviembre y enero.

Conclusiones

- ◆ Sin lugar a duda, el jardín vertical ayuda a disminuir la temperatura de las estructuras en promedio 4°C respecto al ladrillo, ya que funciona como un aislante térmico natural entre la radiación y el material de construcción.
- ◆ Es más evidente el diferencial térmico en la tarde, debido a que se encuentran diferenciales de temperatura de hasta 7°C entre la temperatura registrada en el ladrillo con respecto al jardín vertical.
- ◆ En la temporada seca, la función del jardín vertical adquiere mayor relevancia, ya que se encontraron diferenciales de temperatura de hasta 2°C en los datos obtenidos para la misma hora; pero en distintas temporadas. Esto se debe a que refleja una mayor cantidad de radiación dispuesta en estos meses.

Referencias

- [1] F. Fernández García, Manual de climatología aplicada: clima, medio ambiente y planificación. Madrid: Síntesis, 1996.
- [2] Naciones Unidas, "Global Report on Human Settlements 2011: Cities and Climate Change", Río de Janeiro, 2011.
- [3] N. L. Alchapar, E. N. Correa y M. A. Cantón, "Índice de reflectancia solar de revestimientos verticales: Potencial para la mitigación de la isla de calor urbana", *Ambient. Constr.*, vol. 12, n.º 3, p. 17, 2012.
- [4] E. C. Valor, "Análisis comparativo del efecto de isla térmica de la ciudad de Valencia con imágenes TM, MUST y AVHRR", *Revista de Teledetección*, n.º 14, 2000.
- [5] S. Grimmond, "Urbanization and global environmental change: Local effects of urban warming", *Geograph. J.*, vol. 173, n.º 1, pp. 83-88, 2007. https://doi.org/10.1111/j.1475-4959.2007.232_3.x
- [6] Environmental Protection Agency (EPA), "Urban heat island basics, reducing urban heat islands: Compendium of strategies", Estados Unidos, 2009.
- [7] Naciones Unidas, "World urbanization prospects", New York, 2001.
- [8] Naciones Unidas. Las ciudades seguirán creciendo, sobre todo en los países en desarrollo. Nueva York, 2018.
- [9] Naciones Unidas, "World urbanization prospects: the 2003 Revision", New York, 2004.
- [10] R. Kotharkar, A. Ramesh y A. Bagade, "Urban Heat Island studies in South Asia: A critical review", *Urban Climate*, vol. 24, pp. 1011-1026, 2018.
- [11] T. Oke, "Urban climates and global environmental change", *Applied Climatology: Principles and Practice*, pp. 273-287, 1997.
- [12] N. Wong y C. Yu, "Study of green areas and urban heat island in a tropical city", *Habitat International*, n.º 29, pp. 547-558, 2005.
- [13] T. Oke, *Boundary Layer Climates*. London: Taylor & Francis e-Library, 2002.
- [14] S. E. Lee y G. Levermore, "Simulating urban heat island effects with climate change on a Manchester house", *Urban Climate*, pp. 203-221, 2013.
- [15] G. Cueto, O. J. Martínez y A. Tejada, "Detection of the urban heat island in Mexicali, B. C., México and its relationship with land use", *Atmosfera*, pp. 111-131, 2007.
- [16] M. C. Piccolo y A. Capelli de Steffens, "Isla de calor invernal en Bahía Blanca", en *Anales II Congreso Interamericano de Meteorología*, Argentina, 1987.
- [17] A. M. Capelli de Steffens, M. C. Piccolo y A. M. Campo de Ferreras, "Clima urbano de Bahía Blanca", *Rev. Univ. Geogr.*, vol. 15, n.º 1, 2006, pp. 183-186.
- [18] A. Capelli de Steffens, M. C. Piccolo, J. Hernández González y G. Navarrete, "La Isla de calor Estival en Temuco, Chile", *Papeles de Geografía*, n.º 33, pp. 49-60, 2001.
- [19] F. Salinas, "Estudio experimental del efecto de la isla calórica en la ciudad de Santiago", tesis de pregrado, Universidad de Chile, Chile, 1982.
- [20] P. Sarricolea y J. Martín Vide, "La isla de calor urbana del área metropolitana de Santiago (AMS) de Chile a partir de diferencias térmicas de los observatorios de Talagante y Cerrillos", *Perspectiva Geográfica*, vol. 18, pp. 239-256, 2014.
- [21] P. Berdalh y S. E. Bretz, "Preliminary survey of the solar reflectance cool roofing materials", *Energy and Buildings*, vol. 25, n.º 2, pp. 149-158, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(96\)01004-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(96)01004-3)

- [22] J. D. Pabón Caicedo, "Cambio climático en Colombia: Tendencias en la segunda mitad del siglo XX y escenarios posibles para el siglo XXI", *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, vol. 36, n.º 139, pp. 261-278, 2012.
- [23] J. Pabón, S. Pulido, O. Jaramillo y J. Chaparro, "Análisis preliminar de la isla de calor en la Sabana de Bogotá", *Cuad. Geogr.*, vol. VII, n.º 1-2, 1998.
- [24] A. Poza y J. Feijó, "Acondicionamiento bioclimático: Jardines verticales. Aplicaciones y caso práctico en la escuela de arquitectura de Valladolid", Universidad de Valladolid, España, 2017.
- [25] A. Hernández, J. Ochoa y J. Molina, "Evaluación del comportamiento hídrico de un jardín vertical de interior", Universidad Politécnica de Cartagena, 2016.
- [26] M. Pomerantz, B. Pon, H. Akbari y S.-C. Chang, "The effect of pavements' temperatures on air temperatures in large cities", *reporte*, Lawrence Berkeley National Laboratory Report, 2000.
- [27] L. M. Muñoz Campillo y R. D. Torres Sena, "Las fachadas verdes como herramienta pasiva de ahorro energético en el bloque administrativo de la Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Montería". *DeArq*, n.º 13, pp. 140-149, 2013 [en línea]. Disponible en: <https://revistas.uniandes.edu.co/doi/pdf/10.18389/dearq13.2013.11>
- [28] H. Akbari, "Los árboles de sombra para reducir el consumo de energía, contaminación ambiental y las emisiones de CO2 de las centrales eléctricas", Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, California, 2002.
- [29] A. Acosta y M. Merino, "Sistemas vegetales verticales: Estudio de los efectos de la integración arquitectónica de sistemas vegetales verticales y propuestas de uso como técnica pasiva de ahorro de energía en el clima continental mediterráneo", tesis de maestría, E. U. de Arquitectura Técnica (UPM), 2011.
- [30] L. V. Gómez Forero y C. C. Castañeda Rodríguez, "Estudio del crecimiento urbano con respecto al efecto isla de calor para establecer lineamientos de gestión energético ambiental en Bogotá", en *procedente del 11th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology*, Cancún, México, 2013.
- [31] Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, *Techos Verdes y Jardines Verticales una piel natural para Bogotá*, Bogotá, 2014.
- [32] Alicante Forestal, "El uso del Sedum en las cubiertas vegetales", 17 de julio 2012 [en línea]. Disponible en: <https://www.alicanteforestal.es/el-uso-del-sedum-en-las-cubiertas-vegetales/>
- [33] C. A. Pena Salmon y R. Rojas Caldelas, "Methodology for planning urban green areas: The case of Mexicali, Baja California, Mexico", *Sustainable Development and Planning IV*, vol. 1, pp. 33-41, 2009 [en línea]. Disponible en: <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/SDP09/SDP09004FU1.pdf>
- [34] J. Simon, *Introduction to Thermal Analysis, Techniques and Applications*. New York: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [35] World Meteorological Organization, *Manual on the Global Data-Processing System*. Vol. II. Geneva, 1992 .
- [36] A. Fries, R. Rurger, D. Gotlicher y T. Nauß, et al., "Thermal structure of a megadiverse Andean mountain ecosystem in southern Ecuador and its regionalization", *ERDKUNDE*, vol. 63, n.º 4, pp. 321-335, 2009. <https://doi.org/10.3112/erdkunde.2009.04.03>
- [37] D. Kaiser y M. Köhler, "Evidence of the climate mitigation effect of green roofs—a 20-year weather study on an Extensive Green Roof (EGR) in Northeast Germany", *Buildings*, vol. 9, n.º 7, p. 157, 2019. <https://doi.org/10.3390/buildings9070157>