

Rev. FCA UNCUYO. 2016. 48(1): 197-209. ISSN impreso 0370-4661. ISSN (en línea) 1853-8665.

Problemáticas del cambio climático en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires - aportes de las cubiertas vegetadas en la regulación térmica

Climate change difficulties in the Buenos Aires city contribution of green roofs in regulating the thermal change

Héctor Rosatto¹, Guido Fernando Botta^{1,2}, Alfredo Tolón Becerra³, Hernán Tardito¹, María Leveratto⁴

Originales: *Recepción*: 29/12/2015 - *Aceptación*: 15/03/2016

RESUMEN

La urbanización se define como el crecimiento físico de las áreas urbanas. Alrededor de la mitad de la población del mundo vive en ciudades. Se espera que esta aumente al 61% para el 2030. Las ciudades, pese a su diversidad presentan características ambientales comunes en muchas partes del mundo, como por ejemplo la presencia de la Isla de Calor Urbana (ICU). La ICU evidencia el impacto del hábitat construido sobre el medio físico y el aumento de temperatura que produce. La mayoría de las emisiones de gas de efecto invernadero que contribuyen al cambio climático global, provienen de zonas urbanas. El cambio climático está afectando el clima a escala global y en las ciudades no solo modifica las condiciones del ciclo hidrológico, sino también afecta la ICU. Para Buenos Aires se está pronosticando, en el período 2020-2029, un aumento de las temperaturas promedio máximas en 0,6°C hasta más de 2°C. La ley N° 3.871, de adaptación y mitigación al cambio climático en Buenos Aires, propone medidas mínimas de adaptación. Una de ellas son las cubiertas verdes, las cuales, ayudarían principalmente a amortiguar las temperaturas extremas y la isla de calor urbano. El objetivo del presente trabajo fue determinar si, para las condiciones climáticas de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA), las cubiertas vegetadas (con las características del sitio de estudio), pueden significar un aporte a la regulación de temperatura. El estudio permite afirmar, para las condiciones climáticas, período y tipo de cubierta estudiada, que las mismas pueden ser un aporte a la regulación térmica de las edificaciones.

Palabras clave

isla de calor • techos verdes • regulación térmica

- 1 Departamento de Ingeniería Agrícola y Uso de la Tierra, Facultad de Agronomía - Universidad de Buenos Aires (UBA). Av. San Martín 4453-C1417DSE. Buenos Aires. Argentina. rosatto@agro.uba.ar
- 2 Departamento de Tecnología, Universidad Nacional de Luján.
- 3 Área de Proyectos de Ingeniería. Universidad de Almería. Carretera Sacramento s/n. La Cañada de San Urbano. (04120) Almería, España.
- 4 Posgrado de especialización en Tecnologías Urbanas Sostenibles. Facultad de Ingeniería-UBA.

ABSTRACT

Urbanization is defined as the physical growth of urban areas. About half of the world's population now lives in cities, and expected that this amount will increase to 61% by 2030, this growth will be more pronounced in developing countries. Cities are the habitat for excellence of human, and present environmental characteristics (urban climate) common in many parts of the world, as for example the presence of the island of urban heat (ICU). The urban heat island reveals the impact of habitat built on the physical environment and the increase in temperature that produces. The majority of greenhouse gas emissions that contribute to global climate change come from urban areas. Climate change is affecting climate globally and in cities not only modifies the conditions of the hydrological cycle, but also affects the ICU. The increase of the temperature according to the models established by the Intergovernmental Panel on climate change could emphasize over the next decades. For Buenos Aires the models predict, specifically in the 2020-2029 period, an increase of average maximum temperatures in 0.6°C to 2°C (for the minimum temperature average). Law number 3.871, called: adaptation and mitigation to climate change in the Autonomous city of Buenos Aires, proposed minimum solutions of adaptation. One of these proposed solutions are the green roofs, which (mentions the law), mainly can help as buffer against temperature extremes and the urban heat island. The objective of the present study was to determine, for the climatic conditions of the Autonomous city of Buenos Aires (CABA), if the green roofs (built with substrates and vegetation available at the study site), can make a contribution to the regulation of the temperature. The study make it possible to say, for the analyzed case and in the climatic conditions of the CABA in the period and types of green roofs studied, that the same may be a contribution to the thermal regulation of buildings.

Keywords

heat island • green roofs • thermal regulation

INTRODUCCIÓN

La urbanización se entiende como el crecimiento físico de las áreas urbanas. Es el movimiento de personas de zonas rurales a zonas urbanas que generalmente está influenciado por la modernización y la industrialización de la economía. Hoy, el desarrollo económico representa una importante variable dentro de los indicadores de gestión de ciudades, por lo tanto, el auge de la construcción ha llevado al levantamiento masivo de grandes edificios. Muchas personas llegan a las ciudades en busca de mejores condiciones de vida y oportunidades laborales, justificando un alto crecimiento poblacional en

el ámbito urbano, por esto el constante crecimiento de la población humana ha llevado a lo largo de la historia a establecer asentamientos urbanos en grandes urbes. Aproximadamente la mitad de la población del mundo vive actualmente en ciudades, y se espera que esta cantidad aumente al 61% para el 2030 (18).

Existe una tendencia manifiesta del aumento del nivel de urbanización, que según predicciones de Naciones Unidas para América Latina (17), se incrementaría, del 71% actual, hasta 81% en el 2025. A su vez, Naciones Unidas (18), estima un incremento en la cantidad de

personas que viven en las ciudades de un 85% entre 2009 y 2050, crecimiento que será más pronunciado en los países en vías de desarrollo.

Las ciudades constituyen el hábitat por excelencia de los seres humanos, y pese a su diversidad presentan características ambientales (clima urbano) comunes en muchas partes del mundo, como por ejemplo la presencia de la Isla de Calor Urbana (ICU), que corresponde a un aumento de origen antrópico de las temperaturas de la ciudad en comparación con su entorno inmediato de carácter natural y rural, siendo más intensa dicha diferencia en las noches (25).

La isla de calor de zonas urbanas evidencia el impacto del hábitat construido sobre el medio físico y el aumento de temperatura que produce (8).

La Agencia Internacional de energía ha estimado que el consumo de combustibles y las emisiones de CO₂ de automóviles a nivel mundial se duplicarán entre el 2000 y el 2050 (26).

La mayoría de las emisiones de gas de efecto invernadero que contribuyen al cambio climático global, provienen de zonas urbanas. Por consiguiente, estas emisiones contribuyen a las condiciones del tiempo a escala local y global, y también a la modificación del clima (7).

El cambio climático es un fenómeno atmosférico global que origina desequilibrios ambientales con manifestaciones muy graves en las ciudades y evidentemente las hace más vulnerables (21).

Por "cambio climático" se entiende un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables. El Cambio Ambiental Global (CAG) es un

concepto que pretende ampliar y complejizar los conceptos de Cambio Climático y Variabilidad Climática (16).

La variabilidad climática puede deberse a procesos internos naturales del sistema climático (variabilidad interna) o a variaciones del forzamiento externo natural o antropogénicas (variabilidad externa) (9).

Este cambio está afectando el clima a escala global y en las ciudades no solo modifica las condiciones del ciclo hidrológico, sino también afecta la ICU. El incremento de la temperatura según los modelos establecidos por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático, podría acentuarse durante las próximas décadas (4).

Para Buenos Aires se está pronosticando en base a modelizaciones, específicamente en el período del 2020 - 2029, un aumento de las temperaturas promedio máximas en 0,6°C y hasta más de 2,0°C para la temperatura mínima promedio. Se prevé que aumentará la temperatura en 1 °C en 50 años en zonas urbanas y algo menos en zonas rurales (10).

En Buenos Aires las olas de calor intensas (con temperaturas máximas diarias sobre 34°C) ocurren no solamente en verano, sino también en invierno. La isla urbana de calor aparece en invierno y en verano en la noche, mientras que se observa una isla urbana de frío en el verano, durante el día. Hay una tendencia en la reducción de la isla de calor nocturna y tendencia a mayor nubosidad en la noche (10).

Vilatte *et al.* (2014), sostienen la importancia de generar políticas de desarrollo urbanístico e infraestructura para evitar daños recurrentes en el sector urbano.

Redondo Paredes (2014), menciona que si se juntan las variables de reducción de espacios públicos como son las zonas verdes, con una gran cantidad de vehículos

circulando diariamente, se obtiene una alta contaminación atmosférica en determinadas zonas, además de otros tipos de contaminación indirecta como lo son la auditiva y visual.

Los efectos del cambio climático y de los procesos de crecimiento urbano han provocado un deterioro ambiental en la Región Metropolitana Buenos Aires (23).

Un elemento destacable fue la promulgación, en 2011, de la Ley de adaptación y mitigación al cambio climático en la ciudad autónoma de Buenos Aires, N° 3.871, que define las acciones y medidas mínimas de adaptación. Una de esas medidas propuestas son las cubiertas verdes, las cuales ayudan principalmente a amortiguar las temperaturas extremas y la isla de calor urbano. Son de particular importancia en zonas con escaso arbolado. Otras medidas de diseño urbano y de corredores verdes apuntan también a la problemática de las islas de calor y problemática de ventilación, enfatizando el papel del arbolado y de la vegetación en general en el marco de la adaptación (11).

En un estudio realizado sobre la contribución de los techos verdes en la sustentabilidad de las ciudades estudiadas, se menciona que en el primer año de observaciones se demostró que los mismos son eficaces para reducir el flujo de calor desde el techo y consecuentemente, gracias a la regulación de la temperatura, reducen la demanda de energía para el acondicionamiento de los espacios en el edificio. Asimismo, sostienen que los techos verdes son eficaces en la reducción de la temperatura alta y en las fluctuaciones de temperatura diurna experimentados por la membrana del techo en el sistema de techado convencional en el verano (27).

Valdes-Parada y Freyre-Fonseca (2010), citando diversos autores mencionan que

la temperatura del aire disminuye entre la superficie de la vegetación desde 26°C hasta 12,6°C en promedio durante el día. Asimismo, dichos cambios se deben a la geometría de los vegetales y la humedad que estos promueven, así como los procesos fotosintéticos.

De esta manera, se ha demostrado que una pequeña capa de suelo funciona como un aislante térmico para los interiores de los edificios. Las azoteas verdes funcionan incrementando el aislamiento y reduciendo la demanda de aire acondicionado y calentadores. Por lo tanto, se reducen las necesidades de energía en tiempos de calor o de frío. Los mismos autores, sostienen que, aunque el incorporar azoteas verdes, no se traduce en cambios drásticos de la temperatura promedio a lo largo del día, este tipo de sistemas tiene un efecto estabilizador en los perfiles locales, lo cual se traduce en una mayor uniformidad de temperatura en la edificación.

Se debe mencionar que son muy escasos los trabajos en la ciudad de Buenos Aires, Leveratto *et al.* (2014), mencionan que la incorporación de cubiertas verdes tiene un impacto favorable en la reducción de temperaturas superficiales de techos, particularmente durante el día. En horarios nocturnos la capacidad de enfriamiento es mucho menor, ya que el aporte de la evapotranspiración es muy reducido. Pero en todos los casos, presentan mayor capacidad de enfriamiento nocturno, que un techo de membrana tradicional. Durante un día de verano soleado y de altas temperaturas, una cubierta verde con niveles medios de humedad de sustrato, registra en promedio temperaturas superficiales entre 6 y 9 grados centígrados más bajas que un techo tradicional de color gris claro con revestimiento plateado y cierto desgaste.

Objetivo general

Determinar si, para las condiciones climáticas de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA), las cubiertas vegetadas (construidas con sustratos y vegetación disponibles en el sitio de estudio), pueden significar un aporte a la regulación de la temperatura.

Objetivos específicos

Determinar el comportamiento de una cubierta vegetada con y sin riego artificial, en la regulación de la temperatura interior de una vivienda, en los meses del año que suelen ser más cálidos en el sitio de estudio (enero y febrero).

Determinar la variación de la temperatura dentro de la vegetación implantada y en la base del sustrato de una cubierta vegetada, con y sin riego artificial, en los meses del año que suelen ser más cálidos en el sitio de estudio (enero y febrero).

Hipótesis

La cubierta vegetada permite, en los meses de enero y febrero, contribuir a una disminución de la temperatura interior de la edificación y dicha disminución es mayor en las cubiertas vegetadas con riego.

La temperatura en el interior de la vegetación y en la base del sustrato de una cubierta vegetada es menor cuando la cubierta es con riego.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Por gentileza de la Agencia de Protección Ambiental (APA) del Ministerio de Ambiente y Espacio Público del Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires, se pudo acceder a la generación de la infor-

mación térmica a partir de la utilización de un techo verde construido (existente) de tipo extensivo en la terraza (techo accesible) de una construcción edilicia existente en CABA y perteneciente al Gobierno de la Ciudad.

La Dirección General de Estrategias Ambientales - Agencia de Protección Ambiental (APA) del Ministerio de Ambiente y Espacio Público del Gobierno de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, crea en el año 2010 el "Programa de Cubiertas Verdes en Edificios Públicos" con el objeto de impulsar la instalación de cubiertas con vegetación en edificios administrados por el sector público de la Ciudad.

Fruto de este programa, se realizó la construcción de un techo verde en la terraza de un edificio público, en el centro de CABA, seleccionado por contar con una terraza accesible por escalera principal y con barandas de protección en todo su perímetro, con buen asoleamiento y un diseño edilicio que facilita mediciones comparativas. La cubierta se encuentra orientada al noreste, con acceso de sol directo durante todo el año, aun estando ubicada en un área de la ciudad densamente construida.

Bajo la premisa que el peso total máximo de la cubierta verde terminada debe ser menor a 180 Kg/m², con sustrato húmedo, se diseñó una cubierta verde utilizando materiales y sistemas constructivos tradicionales y de obtención razonablemente sencilla en el mercado local.

Para más detalles sobre la construcción de esta terraza, puede consultarse: APA (2014). Esta terraza fue diseñada originariamente con baldosas cementicias elevadas, formando una cámara de aire sobre la membrana aislante hidrófuga.

Zona climática. Característica de la zona de estudio

El clima de Buenos Aires es del tipo templado. Se registran veranos calurosos e inviernos moderadamente fríos. Si bien es húmedo todo el año, las precipitaciones son más abundantes en primavera - verano que en los meses de invierno. La temperatura media anual es de 17,6°C mientras que la humedad relativa promedio es del 71,4%.

Julio corresponde al mes más frío, con una temperatura media de 10°C y mínimas extremas de 0 a -2°C. Sin embargo, en las zonas suburbanas, las temperaturas pueden descender a -5°C. Son poco habituales las heladas debido a dos causas: la aglomeración urbana provoca una isla de calor (a pocos km del centro de Buenos Aires la temperatura suele ser de 2 a 5°C menor) y el hecho que las olas de frío durante el invierno suelen coincidir con la ocurrencia del viento pampero, el cual por haber atravesado la Patagonia y previamente la cordillera de los Andes ha perdido la mayor parte de su humedad. Las únicas veces que nevó en el siglo XX fueron en junio de 1918 por la noche, y en 1967 muy leve, pero diurna. El 9 de julio de 2007 se registró la última nevada en toda la ciudad donde nevó durante toda la tarde. Hay que considerar que la sensación térmica puede ser más baja por efecto del viento, llegando a -3°C en la capital y -7°C en la periferia. Los días en invierno suelen ser muy húmedos, con lloviznas.

El mes más caluroso es enero, con una temperatura media de 24-25°C. Las máximas promedio son de 30°C durante ese mes. El calor es húmedo, por lo que la sensación térmica puede ser muy superior a la temperatura real. El día más caluroso del año suele ser de 37°C a 39°C, con sensaciones térmicas de hasta 42°C. A la noche, la temperatura desciende levemente (6).

Toma de datos

Una "cubierta naturada" involucra la construcción de espacios verdes "contenidos" encima de una estructura hecha por el hombre. Este espacio verde puede estar sobre, en o debajo del nivel del piso, pero en todos los casos la vegetación no es plantada en el "suelo natural". La materialización de cubiertas vegetadas en una ciudad se encuentra condicionada (técnicamente), cuando se trata de construirlas sobre estructuras ya existentes, y que en su cálculo no han contemplado el peso extra que representa la instalación de la cubierta (22).

Rosatto *et al.* (2013), describen las cubiertas vegetadas de tipo "intensivo" y "extensivo", siendo estas últimas las más aptas para ser utilizadas en el sitio de estudio.

Si bien el estudio se planteó para comparar cubiertas vegetadas con y sin riego, se consideró importante para la viabilidad del sistema, que la vegetación a utilizar se seleccionase en función a su escaso mantenimiento.

La elección de especies con capacidad de adaptación a recursos limitados es un criterio fundamental desde el enfoque de la sustentabilidad (Carrieri *et al.*, 1996 citado por Martínez *et al.*, 2013).

Materialización del ensayo

Se construyó un sector de cubierta naturada con riego, otro sin riego y un sector se dejó únicamente con membrana impermeable como testigo.

Se ubicaron los sensores de temperatura o *Dataloggers* en los sitios a estudiar (exterior: testigo, ambiente exterior, cubierta verde con riego y sin riego e interior: cielo raso y ambiente interior).

Componentes del ensayo

En lo referente a la toma de datos, se realizó observaciones en los siguientes tratamientos en los meses de enero y febrero (verano en el Hemisferio Sur) (tabla 1).

Valoración estadística

Uno de los valores estadísticos más recomendado por la Bibliografía (Li (1991), USGS (1998) y Yang y Hodler (2000), para estudiar series de datos, es el RMSE (Root Mean Squared Error).

En este caso, este índice de precisión se utilizó para determinar la tolerancia a utilizar (tres veces el RMSE) a fin de eliminar de la serie de datos todas aquellas anomalías debidas al mal funcionamiento de los sensores y que no pueden considerarse errores, sino equivocaciones.

El criterio para la validación de datos fue entonces, que no superaran la tolerancia estipulada (3 veces el RMSE) y en caso de superarlas, se eliminarían de la serie, actualizándose en cada eliminación de datos el RMSE, hasta que no apareciesen más datos por encima de la tolerancia.

Con los datos obtenidos, se realizó un ANVA con el método de comparación de Duncan y un nivel de significación de 0,95.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de los datos obtenidos por los sensores interiores y exteriores tanto en la zona con el techo verde construido como en el testigo sin techo verde, y luego de aplicar los criterios establecidos en el ítem anterior (valoración estadística), se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 1. Tratamientos.

Table 1. Treatments.

Ubicación del sensor Tratamiento CCAA	Temperatura del aire (a 20 cm)	Temperatura dentro de la vegetación	Temperatura dentro del sustrato (a nivel de la base del mismo)	Temperatura del aire (interior)
Sin Cubierta Verde: Testigo (exterior de la edificación)	X	-----	-----	-----
Con Cubierta Verde con Riego (exterior de la edificación)	X	X	X	-----
Con Cubierta Verde sin Riego (exterior de la edificación)	X	X	X	-----
Sin Cubierta Verde: Testigo (interior de la edificación)	-----	-----	-----	X
Con Cubierta Verde con Riego (interior de la edificación)	-----	-----	-----	X
Con Cubierta Verde sin Riego (interior de la edificación)	-----	-----	-----	X

Para el mes de enero

Exterior del edificio

No hay diferencias significativas en la temperatura del Aire (encima de la cubierta) entre el testigo y los dos tratamientos:

- Temperatura del Aire sobre la Cubierta Verde con Riego (26,96°C);
- Temperatura del Aire sobre la Cubierta Verde sin Riego (27,33°C);
- Temperatura del Aire del Testigo (27,63°C).

En cambio sí se presentaron diferencias significativas entre la temperatura en el testigo y dentro del canopeo (interior de la vegetación):

- Temperatura del Aire dentro del Canopeo de la Cubierta Verde con Riego (24,90°C);
- Temperatura del Aire del Canopeo de la Cubierta Verde sin Riego (25,99°C);
- Temperatura del Aire del Testigo (27,63°C).

De igual manera ocurrió con la temperatura a nivel de la base del sustrato, la temperatura del testigo fue significativamente mayor que la de los dos tratamientos:

- Temperatura en la base del Sustrato de la Cubierta Verde con Riego (25,16°C);
- Temperatura en la base del Sustrato de la Cubierta Verde sin Riego (26,09°C);
- Temperatura del Testigo (sensor a nivel de la membrana del techo) (28,77°C).

Asimismo existen diferencias significativas entre los dos tratamientos.

La temperatura en la base del Sustrato de la Cubierta Verde con Riego es significativamente menor a la temperatura en la base del Sustrato de la Cubierta Verde sin Riego.

García Villalobos (2010), menciona que las plantas solas pueden, a través de la transpiración y la condensación del agua, reducir las oscilaciones de la temperatura. Este proceso se fortalece aún más por la gran capacidad de almacenamiento de calor del agua existente en las plantas y en el sustrato. En este estudio, lo mencionado no ocurre posiblemente debido a que en el mes de enero no ocurrieron precipitaciones lo que

estableció diferencias a favor de la cubierta verde regada. Es importante recordar aquí que los cálculos se confeccionaron sobre la base de las temperaturas medias de los meses analizados.

En la bibliografía suelen reportarse análisis similares pero utilizando temperaturas extremas. Por ejemplo, García Villalobos (2010), menciona estudios realizados en Kassel, Alemania, donde en un sustrato de 16 cm de espesor, la temperatura exterior al mediodía es de 30°C, la de la vegetación 23°C y bajo la capa de sustrato 17,5°C. Otro estudio realizado por Sonne (2006), en la Universidad Central de Florida, donde se instaló un techo verde en un edificio, la máxima diferencia de temperatura registrada entre un techo convencional y otro verde fue de 21°C (54°C en el techo convencional y 33°C en el techo verde).

Estos cambios significativos ocurrieron durante los períodos de los picos de temperatura de ambos, el pico de temperatura de la superficie del techo convencional ocurrió a la 1:00 PM, mientras que el pico de temperatura de la superficie del techo verde ocurrió a las 10:00 PM. La temperatura mínima promedio para el techo convencional fue de 22°C y para el techo verde fue de 29°C. Bajas temperaturas nocturnas en el techo convencional son debido a que su superficie está expuesta directamente al cielo nocturno mientras que la superficie del techo verde se encuentra cubierta con plantas.

En este ensayo, el 29 de enero fue el día más caluroso del mes. Registrada a las 12:15 h la temperatura en el aire de la cubierta testigo fue de 41,80°C, mientras que en el aire de la cubierta verde con riego fue de 32,79°C, a nivel de la

vegetación 27,21°C y debajo del sustrato 25,48°C. Esto demuestra que una cubierta verde en verano tiene un efecto de enfriamiento considerable.

Respecto de las diferencias halladas a nivel de la base del sustrato, la reducción con respecto al testigo de 3,5°C y 2,5°C respectivamente, en cuanto a las situaciones con y sin riego, podría deberse a que el espesor del sustrato, incrementa la capacidad térmica y por lo tanto produce mayor almacenamiento y retraso térmico en las "techumbres" (29).

Por otro lado, el suelo húmedo puede proveer durante todo el día un efecto de aislación adicional en la azotea (35); en este trabajo la diferencia entre las medias de temperatura del sustrato de la Cubierta Verde con riego y sin riego, es de aproximadamente 1°C a favor de la cubierta regada.

Interior del edificio

Interior: Losa Testigo vs Losa cubierta con y sin riego - mes de enero

El análisis estadístico muestra que existen diferencias significativas entre los dos tratamientos y el testigo:

- Temperatura del Aire interior- Cubierta Verde con Riego (25,75°C);
- Temperatura del Aire interior- Cubierta Verde sin Riego (25,81°C);
- Temperatura del Testigo (sensor a nivel de la losa interior del techo) (29,11°C).

La reducción de temperatura de la losa interior de ambas cubiertas verdes respecto del testigo (losa interior de la cubierta sin techo verde) es de 3,3°C, lo que significa una reducción del 11%. Este resultado es congruente con los reportados por Vecchia *et al.* (2006) y Alpuche *et al.* (2010), aunque con valores algo mayores debido a que los ensayos fueron realizados en México y Venezuela.

Por otro lado, si se analiza temperaturas máximas, el ensayo muestra

una reducción respecto de la temperatura exterior de alrededor del 38% tanto para la cubierta verde con riego y sin riego. Estos resultados coinciden con lo mencionado por Santamouris (2014), quien sostiene que muchos estudios han evaluado el flujo total de calor al edificio a través de la azotea verde, citando los resultados expuestos en Lazzarin *et al.* (2005), Onmura *et al.* (2001) y Tang y Jiang (2009), quienes muestran que el flujo total de calor que entra en el edificio por debajo del techo verde se redujo en un 60%, 50% y 73% respectivamente, en comparación con un techo de hormigón convencional y sin techo verde independientemente de las condiciones meteorológicas.

Para el mes de febrero

Exterior del edificio

Del análisis surge que no hay diferencias significativas en la temperatura del Aire (encima de la cubierta) entre el testigo y los dos tratamientos:

- Temperatura del Aire sobre la Cubierta Verde con Riego (25,55°C);
- Temperatura del Aire sobre la Cubierta Verde sin Riego (25,76°C);
- Temperatura del Aire del Testigo (26,49°C).

En cambio sí se aprecian diferencias significativas, a nivel del canopeo, entre el Testigo (con temperatura superior) y la temperatura de la Cubierta Verde con Riego, pero no se encuentran diferencias significativas entre el Testigo y la Cubierta Verde sin Riego. No se aprecian diferencias significativas entre los dos tratamientos:

- Temperatura del Aire dentro del Canopeo de la Cubierta Verde con Riego (24,38°C);
- Temperatura del Aire del Canopeo de la Cubierta Verde sin Riego (25,01°C);
- Temperatura del Aire del Testigo (26,49°C).

Respecto de la temperatura a nivel de la base del sustrato, la temperatura del testigo fue significativamente mayor que

la de los dos tratamientos. Sin embargo, no hay diferencias significativas entre los dos tratamientos:

- Temperatura en la base del Sustrato de la Cubierta Verde con Riego (25,48°C);
- Temperatura en la base del Sustrato de la Cubierta Verde sin Riego (25,91°C);
- Temperatura del Testigo (sensor a nivel de la membrana del techo) (27,57°C).

La falta de diferencias significativas entre los dos tratamientos a nivel canopeo y del sustrato, puede explicarse en razón de que el mes de febrero fue un mes lluvioso.

Interior del edificio

El análisis estadístico muestra que existen diferencias significativas entre el testigo y los dos tratamientos:

- Temperatura del Aire interior- Cubierta Verde con Riego (26,88°C);
- Temperatura del Aire interior- Cubierta Verde sin Riego (26,90°C);
- Temperatura del Testigo (sensor a nivel de la losa interior del techo) (28,78°C).

El ANVA muestra diferencias significativas entre el testigo y los dos tratamientos. Nuevamente aquí por las precipitaciones no existen diferencias significativas entre los tratamientos.

La disminución de temperatura de la losa interior de ambas cubiertas verdes respecto del testigo (losa interior de la cubierta sin techo verde) es de alrededor de 2°C, lo que significa una reducción del 7%. Este resultado es algo menor a los reportados por Vecchia *et al.* (2006) y Alpuche *et al.* (2010), anteriormente citados.

Si se analiza las temperaturas máximas, se encuentran resultados similares a los reportados para el mes de enero. El ensayo nuevamente muestra una reducción respecto de la temperatura exterior de alrededor del 38% tanto para la cubierta verde con riego y sin riego. Estos resultados coinciden con lo mencionado por Santamouris (2014).

Si bien las reducciones de temperatura de todos los tratamientos analizados son de pocos °C, son congruentes con lo mencionado por Alexandri y Jones (2006) para climas húmedos. Sin embargo, llevados a porcentaje los resultados hallados adquieren mayor significación.

Si se recuerda las hipótesis planteadas:

La cubierta vegetada permite, en los meses de enero y febrero, contribuir a una disminución de la temperatura interior de la edificación y dicha disminución es mayor en las cubiertas vegetadas con riego.

La temperatura en el interior de la vegetación y en la base del sustrato de una cubierta vegetada es menor cuando la cubierta es con riego.

Respecto de la primera hipótesis, se puede afirmar que se ha validado la misma, dado que en el mes de enero se verificó una reducción de la temperatura del 11% y del 7% en el mes de febrero.

En cuanto a la segunda hipótesis, la temperatura dentro del canopeo, en el mes de enero, presenta diferencias significativas, tanto respecto de la temperatura del aire (fuera del canopeo) como entre los dos tratamientos (con y sin riego). En este mes, la temperatura en la base del sustrato de la Cubierta Verde con Riego es significativamente menor a la temperatura en la base del Sustrato de la Cubierta Verde sin Riego.

En cambio en el mes de febrero, la temperatura de la cubierta verde con riego fue significativamente menor que la del aire, pero no se verificó diferencias en la temperatura dentro del canopeo de las cubiertas verdes con riego y sin riego y tampoco en la base del sustrato (con y sin riego).

Como se mencionó, lo ocurrido en el mes de febrero podría deberse a que el mismo fue un mes anormalmente lluvioso, lo que enmascara el efecto del riego. Podría decirse entonces, que esta segunda hipótesis ha sido validada solo para el mes de enero.

CONCLUSIONES

Es posible afirmar, en el caso analizado y en las condiciones climáticas de CABA en el período y para los tipos de techos verdes estudiados, que las cubiertas vegetadas pueden ser un aporte a la regulación térmica de las edificaciones.

BIBLIOGRAFÍA

1. Alexandri, E.; Jones, P. 2006. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Elsevier. Building and Environment* 43 (2008). Universidad de Cardiff. Reino Unido. 480-493.
2. Alpuche, M. G.; Moreno, H.; Ochoa, M. J.; Marinic, I. 2010. Análisis térmico de viviendas económicas en México utilizando techos verdes. Departamento de Arquitectura y Urbanismo, Volumen III, N°3. México, Universidad de Sonora.
3. APA. 2014. Cubiertas Verdes en Edificios públicos. Publicación de la Agencia de Protección Ambiental Ministerio de Ambiente y Espacio Público - Disponible en: buenosaires.gob.ar/agenciaambiental. 60 p.
4. Arco Molina, J. G.; Hadad, M. A.; González, A. F.; Roig, F. A. 2015. Muerte foliar en plantines de *Araucaria araucana* (Mol.) K. Koch por efecto de temperaturas de congelamiento. Resultados preliminares. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina.* 47(1): 59-65.
5. Carrieri, S. A.; Codina, R. A.; Manzano, E. R. 1996. Arbolado de rutas en zonas áridas. Propuesta para la Provincia de Mendoza. Ed. Fac. de Ciencias Agrarias. UNCUYO. 105 p.
6. Cátedra de Climatología y Fenología Agrícolas – FAUBA. Comunicación Personal 16/10/2015.
7. Crutzen, P. J. 2004. New Directions: The growing urban heat and pollution island effect-impact on chemistry and climate. *Atmospheric Environment* 38. Pag. 3539-3540.
8. Evans, J. M.; de Schiller, S. 2005. La Isla de Calor en ciudades con clima cálido-húmedo el caso de Tampico, México. *Avances en Energías Renovables y Medio Aire. Argentina.* 9: 37-42.
9. Farreras, V. 2014. Valoración económica de los efectos de la presión antrópica sobre el piedemonte mendocino. Una aplicación de los experimentos de elección discreta. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina.* 46(2): 113-133.
10. García Villalobos, I. 2010. Beneficios de los Sistemas de naturación en las edificaciones. Facultad de Arquitectura, SNES2010-ABC-022. UNAM. México D.F. 5 p.
11. Krellenberg, K.; Jordán, R.; Rehner, J.; Schwarz, A.; Infante, B.; Barth, K.; Pérez, A. (Editores). 2013. *Clima Adaptación Santiago (CAS) - Adaptación al cambio climático en megaciudades de América Latina. Red Regional de Aprendizaje, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)- Documento de proyecto. Naciones Unidas, Santiago de Chile.* 96 p.
12. Lazzarin, R. M.; Castellotti, F.; Busato, F. 2005. Experimental measurements and numerical modelling of a green roof". *Energy and Buildings.* 37(12): 1260-1267.
13. Leveratto, M. J.; González Otharán, F.; Fernández Bados, O.; Propati, M.; Reobo, M.; Satelier, J. 2014. Cubiertas verdes como herramienta para la mitigación de isla de calor en áreas urbanas de la Ciudad de Buenos Aires. *Actas Congreso Solar Cities 2014, Buenos Aires.* Disponible en: http://www.buenosaires.gob.ar/sites/gcaba/files/documents/actas_-_trabajos_completos_0.pdf. 127 a 137.
14. Li, Z. 1991. Effects of check points on the reliability of DTM accuracy estimates obtained from experimental tests. *Photogrametric Engineering & Remote Sensing.* 47(10): 1333-1340.
15. Martínez, C. F.; Cavagnaro, J. B.; Roig Juñent, F. A.; Cantón, M. A. (2013). Respuesta al déficit hídrico en el crecimiento de forestales del bosque urbano de Mendoza. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Univ. Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina.* 45(2): 47-64.

16. Mussetta, P.; Barrientos, M. J. 2015. Vulnerabilidad de productores rurales de Mendoza ante el cambio ambiental global. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina.* 47(2): 145-170.
17. Naciones Unidas (CELADE – CEPAL). 1999. América Latina: Proyecciones de población urbano rural 1970 – 2025. *Boletín Demográfico No. 63. Santiago, Chile.*
18. Naciones Unidas (UNDESA). 2010. *World Urbanization Prospects. The 2009 Revision. ESA/P/WP/215.* Disponible en: http://esa.un.org/unpd/wup/Documents/WUP2009_Highlights_Final.pdf
19. Onmura, S.; Matsumoto, M.; Hokoi, S. 2001. Study on evaporative cooling effect on roof lawn gardens. *Energy and Buildings.* 3: 653-666.
20. Redondo Paredes, D. F. 2014. Beneficios socio ambientales de las infraestructuras verdes urbanas y su aplicación en la construcción y planificación urbanística en la ciudad de Bucaramanga. *PUENTE. Revista Científica. Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.* 15-23.
21. Rodríguez Laredo, D. M. 2011. La gestión del verde urbano como un criterio de mitigación y adaptación al cambio climático. *Revista Institucional de Ciencias, Tecnología e Innovación: Investig@UMSA [online].* 2(2): 54-70.
22. Rosatto, H.; Meyer, M.; Laureda, D.; Cazorla, L.; Barrera, D.; Gamboa, P.; Villalba, G.; Bargiela, M.; Pruzzo, L.; Rodríguez Plaza, L.; Mazzeo, N.; Caso, C.; Rocca, C.; Hashimoto P.; Kohan, D.; Quaintenne, E. 2013. Eficiencia en la retención del agua de lluvia de Cubiertas Vegetadas de tipo “Extensivo” e “Intensivo”. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina.* 45(1): 169-183.
23. Rosatto, H.; Moyano, G.; Cazorla, L.; Laureda, D.; Meyer, M.; Gamboa, P.; Bargiela, M.; Caso, C.; Villalba, G.; Barrera, D.; Pruzzo, L.; Rodríguez Plaza, L.; Oliveri, A.; Waslavsky, A.; Hashimoto, P.; Kohan, D. 2015. Cubiertas Vegetadas de tipo “Extensivo” - Eficiencia en la retención del agua de lluvia de distinto tipo de Vegetación Implantada. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina.* 47(2): 123-134.
24. Santamouris M. 2014. Cooling the cities-A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Elsevier. Solar Energy. Atenas. Grecia.* 103: 682-703.
25. Sarricolea, P.; Aliste, E. Castro, P.; Escobedo, C. 2008. Análisis de la máxima intensidad de la isla de calor urbana nocturna de la ciudad de Rancagua (Chile) y sus factores explicativos. *Revista de Climatología.* 8: 71-84.
26. Secretaría de Energía (SENER). 2011. *Transición energética y el aprovechamiento sustentable de la energía. Estados Unidos Mexicanos. Gobierno Federal.* 99 p.
27. Pandey, S.; Hindoliya, D. A.; Mod, R. 2012. Artificial neural network for prediction of cooling load reduction using green roof over building in Sustainable City. *Sustainable Cities and Society.* 3: 37-45.
28. Sonne, J. 2006. Evaluating green roof energy performance. *ASHARE Journal.* Vol 48: 59-61. Universidad de Florida. EE UU
29. Tang, M.; Jiang, L. 2009. Analysis on thermal measuring of green roof. *Journal of Central South University of Technology.* 16: 150-153.
30. United States Geological Survey (USGS). 1998. *Standards for Digital Elevation Models. National Mapping Program - EEUU.* 410 p.
31. Valdes-Parada, F. J.; Freyre-Fonseca, V. 2010. Análisis de la transferencia de calor en azoteas verdes. *XXXI Encuentro Nacional de la AMIDIQ. Huatulco, Oaxaca.* 7 p.
33. Vecchia, F.; Castañeda, G.; Quiroa, J. A. 2006. Aplicación de cubiertas verdes en climas tropicales. Ensayo experimental comparativo con techumbres convencionales artículo tecnología y construcción. *Venezuela, Caracas.* 22: 09-13.
34. Vilatte, C.; Aguas, L.; Confalone, A. 2014. Influencia de los ciclos solares sobre las precipitaciones en Azul, provincia de Buenos Aires. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina.* 46(1): 227-233.

35. Wong Nyuk Hien; Yu Chen; Chui Leng Ong; Angelia Sia. 2003. Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment. Elsevier. Building and Environment. Singapore. 38: 261-270.
36. Yang, X.; Hodler, T. 2000. Visual and statistical comparisons of surface modeling techniques for point-based environmental data. Cartography and Geographic Information Science, 27(2): 165-176.