

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SALTA
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS
DOCTORADO EN CIENCIAS - ÁREA ENERGÍAS RENOVABLES



TESIS DOCTORAL

TECNOLOGÍAS VERDES EN ZONAS ÁRIDAS.
DISEÑO Y EVALUACIÓN ENERGÉTICO-AMBIENTAL
DE SISTEMAS DE VEGETACIÓN DE APLICACIÓN EN
CUBIERTAS EDILICIAS.

Ing. Agr. JUAN EMILIANO FLORES ASIN

Directora: Dra. Claudia Fernanda Martinez

Codirectora: Dra. Silvana Elinor Flores Larsen

Mendoza, Argentina. Marzo, 2019

Agradecimientos

La presente tesis de investigación se desarrolló gracias a todas aquellas personas e instituciones que me acompañaron en este proceso.

Deseo expresar mi agradecimiento al equipo que conforma el INAHE. A la DEA Arq. María Alicia Cantón, a la Dra. Erica Correa, a la Dra. Noelia Alchapar, a la Dra. Julieta Balter, a la Dra. María Victoria Mercado y al Dr. Gustavo Barea por el gran apoyo profesional y personal que me han brindado a lo largo de todo este trabajo. A la Dra. Claudia Martínez por su apoyo incondicional, su optimismo y su dedicación, del mismo modo a la Dra. Silvana Flores Larsen, ya que ambas en conjunto han sido pilares para lograr llegar con éxito a esta meta.

En especial a mis amigas y compañeras del INAHE; Dra. María Belén Sosa, Dra. Susana Stocco, Dra. María Angélica Ruiz, Arq. Ana Laura Castillo, Arq. María Emilia Balmaceda, Dra. Ayelen María Villalba, Dra. Julieta Yamin, Dra. Macé De Gastines Maureen; por el incondicional sostén, colaboración y consejos, por tantas horas de trabajo compartidas, motivaciones y alegrías que tanto me han acompañado y alivianado las jornadas.

Agradezco también a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) y al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) por hacer posible mi formación doctoral.

Finalmente agradezco a mi madre y amigos por estar siempre a mi lado.

Resumen

El trabajo de tesis doctoral aborda el estudio de cubiertas vegetadas en zonas áridas como alternativa tecnológica para incrementar las áreas verdes en medios construidos, atendiendo a que el enverdecimiento urbano constituye una estrategia viable en el marco del desarrollo sustentable. Sin embargo, su implementación impone desafíos derivados del establecimiento y permanencia de la vegetación a largo plazo dadas las fluctuaciones de temperatura diarias y estacionales, la limitada disponibilidad de agua, la exposición al viento, y la intensa radiación solar que pueden propiciar entornos hostiles para el crecimiento de las plantas. Dichas presiones tienen mayor impacto en regiones climáticas de alta vulnerabilidad ambiental, como es el caso de Mendoza - Argentina, debido a la ocurrencia de temperaturas extremas, bajos patrones de precipitación y, desuniforme distribución de las lluvias.

En función de lo expuesto, la temática ha sido desarrollada en torno a dos ejes temáticos: a) Evaluación del comportamiento biológico de las especies que integran el paquete tecnológico a los fines de seleccionar especies vegetales apropiadas, de posible incorporación a los sistemas de naturación urbana y, b) Evaluación de la respuesta térmica de las cubiertas vegetadas a escala urbana y edilicia con el objeto de contribuir a disminuir las temperaturas urbanas y sus consecuentes impactos en la reducción de consumos de energía para alcanzar condiciones de confort en espacios interiores.

Desde el punto de vista metodológico, la respuesta biológica de las especies fue evaluada mediante el análisis de la cobertura vegetal, conductancia estomática, consumo hídrico y su aporte en peso al sistema. Se realizaron ensayos experimentales en condiciones controladas, para un conjunto de 14 especies preseleccionadas en función de su aptitud teórica para integrar el paquete biológico de las cubiertas vegetadas en zonas áridas. La respuesta térmica fue evaluada en forma comparativa con cubiertas tradicionales en box de ensayos, en condiciones controladas y, mediante la predicción del comportamiento térmico de escenarios teóricos a escala edilicia y urbana. A tal fin se emplearon softwares de libre disponibilidad: EnergyPlus y ENVI-met.

Los resultados obtenidos han demostrado una adaptación significativa al sistema de cultivo en cubiertas vegetadas de la especie exótica *Aptenia cordifolia* y dos especies nativas *Hyalis argentea* y *Nassella tenuissima*. Esto se debe a que alcanzaron coberturas vegetales superiores al 70%; respuesta positiva al riego en base a su administración de la apertura estomática y diferencias de temperatura de hoja; al aprovechamiento del agua de lluvia y al mínimo o intermedio consumo hídrico. Por último, desarrollaron un reducido peso adicional sobre la capacidad portante de las cubiertas.

Desde el punto de vista térmico, los ensayos experimentales en prototipos a escala, mostraron que la incorporación de cubiertas vegetadas permite disminuir la temperatura media interior entre 2 y 3 °C y la amplitud térmica entre 7 y 9 °C, durante la estación cálida para zonas áridas. En consecuencia, se alcanza el objetivo propuesto respecto de lograr diseños de cubiertas vegetadas que sean eficientes en la mejora de las condiciones de habitabilidad térmica de los espacios interiores, bajo las condiciones climáticas imperantes. Por último, las simulaciones con EnergyPlus demostraron que la temperatura media interior del caso con cubierta tradicional aislada mejora la situación de base -

cubierta sin aislar-, y esta mejora aumenta levemente con una cubierta vegetada con *Aptenia cordifolia*. Con respecto al ahorro energético, se alcanzan reducciones del orden del 50 % respecto al consumo del caso base con cubierta tradicional sin aislar, y de un 11 % respecto al caso base con cubierta aislada. Y, a escala urbana, el uso de cubiertas vegetadas respecto a cubiertas con membranas de aluminio ofrece disminuciones de temperatura en relación directa a la densidad constructiva, siendo más eficientes en entornos de alta densidad.

De lo descrito se desprende que la incorporación de nuevas tecnologías verdes -cubiertas vegetadas- apropiadas a contextos urbanos de alta heliofanía y baja disponibilidad del recurso hídrico, constituye una estrategia de desarrollo urbano-edificio sustentable, que contribuye a disminuir los consumos energéticos a escala edilicia, fortalecer las condiciones ambientales de las ciudades de zonas áridas, y mitigar el calentamiento global a escala macro.

Abstract

This thesis addresses the study of roofs in arid regions as a technological alternative to increase green areas in built-up areas, taking into account that urban greening constitutes a viable strategy within the framework of sustainable development. However, its implementation imposes challenges derived from the establishment and permanence of vegetation in the long term given the daily and seasonal temperature fluctuations, the limited availability of water, the exposure to the wind, and the intense solar radiation that can cause hostile environments for the growth of the plants. These pressures have greater impact in climatic regions of high environmental vulnerability, as is the case of Mendoza - Argentina, due to the occurrence of extreme temperatures, low precipitation patterns and, uneven distribution of rainfall.

Based on the above, the theme has been developed around two thematic axes: a) Evaluation of the biological behavior of the species that make up the technological package in order to select appropriate plant-species, of possible incorporation to the systems of urban nature and; b) Evaluation of green roofs thermal response at urban and building scale, in order to help reduce urban temperatures and their consequent impacts on the reduction of energy consumption to achieve comfort conditions in indoor spaces.

Methodologically, the biological response of the plant-species was evaluated through the analysis of vegetation cover, stomatal conductance, water consumption and its contribution in weight to the system, in experimental tests under controlled conditions. Experimental tests were done under controlled conditions, for 14 preselected plant-species according to their theoretical aptitude to integrate the biological package of green roofs in arid zones. The thermal response was evaluated comparatively with traditional roofs in test boxes, under controlled conditions. It also was predicted the thermal behavior of theoretical scenarios at the building and urban scale using freely available software: Energy Plus and ENVI-met.

The results obtained have shown a significant adaptation to the growth media in green roofs, vegetated with the exotic species named *Aptenia cordifolia* and two native species, *Hyalis argentea* and *Nassella tenuissima*. This is due to the fact that they reached vegetable cover higher than 70%; positive response to irrigation based on their administration of the stomatal opening and leaf temperature differences; to the use of rainwater and to the minimum or intermediate water consumption; and, finally, to the reduced weight that they add to the carrying capacity of the roofs.

From the thermal point of view, the experimental tests showed that the incorporation of green roofs allows reducing the average interior temperature between 2 and 3 °C and the thermal amplitude between 7 and 9 °C during the summer season for arid zones. Consequently, the proposed objective with respect to achieving designs of green roofs that are efficient in improving the thermal habitability conditions of the interior spaces, under the prevailing climatic conditions is reached. Finally, the simulations with EnergyPlus showed that the internal temperature of the case with traditional isolated cover improves the base situation - covered without isolating -, and this improvement increases slightly with a green roofs with *Aptenia cordifolia*. With respect to energy saving, reductions of around 50% are achieved with respect to the consumption of the

base case with traditional uninsulated roof, and of 11% with respect to the base case with isolated roof. On the urban scale, the use of green roofs and the aluminum membrane roofs offers decreases in temperature in direct relation to the building density, being more efficient in high-density environments.

From the above it is clear that the incorporation of new green technologies -green roofs- appropriate to urban contexts with high heliophany and water resources shortage is a sustainable urban-development strategy, which contributes to reduce energy consumption at the building scale, strengthen the environmental conditions of cities in arid zones, and mitigate global warming on a macro scale.

Índice general

.....	
PREFACIO.....	10
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	11
Sostenibilidad ambiental de las ciudades.....	12
Cubiertas vegetadas	13
Cubiertas vegetadas en ciudades de zonas áridas	18
Área de estudio	21
HIPOTESIS	25
OBJETIVOS.....	25
CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES	26
Marco conceptual de antecedentes bibliográficos	27
Comportamiento biológico y ecológico de cubiertas vegetadas.....	28
Comportamiento térmico y energético de cubiertas vegetadas.....	31
CAPÍTULO 3: RESPUESTA BIOLÓGICA DE CUBIERTAS VEGETADAS EN ZONAS ÁRIDAS.....	46
Metodología de investigación de respuesta biológica de cubiertas vegetadas	47
Resultados de investigación de respuesta biológica de cubiertas vegetadas	68
Conclusiones de investigación de respuesta biológica de cubiertas vegetadas	85
CAPÍTULO 4: RESPUESTA TÉRMICA DE CUBIERTAS VEGETADAS EN ZONAS ÁRIDAS	90
I-Metodología de investigación de respuesta térmica de cubiertas vegetadas a través de ensayos experimentales.....	91
I-Resultados de respuesta térmica de cubiertas vegetadas a través de ensayos experimentales	108
I-Conclusiones de respuesta térmica de cubiertas vegetadas a través de ensayos experimentales	129
II-Metodología de investigación de respuesta térmica de cubiertas vegetadas a través de herramientas de predicción del microclima urbano y edilicio	132
II-Resultados de respuesta térmica de cubiertas vegetadas a través de herramientas de predicción del microclima urbano y edilicio	141
II-Conclusiones de respuesta térmica de cubiertas vegetadas a través de herramientas de predicción del microclima urbano y edilicio.....	156
CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	160
BILIOGRAFÍA.....	171
ANEXOS.....	192

PREFACIO

El trabajo de tesis doctoral que aquí se presenta se ha estructurado de forma de facilitar la lectura y ordenar las secciones de forma consecuyente. A este documento lo componen cinco capítulos, además de bibliografía y anexos. Cada capítulo representa ejes temáticos de la tesis y presentan una conformación similar, es decir, los mismos apartados. Comienzan con un resumen explicativo e introductorio de la temática del capítulo al inicio, su metodología, resultados y conclusiones específicas en particular los capítulos 3 -RESPUESTA BIOLÓGICA DE CUBIERTAS VEGETADAS EN ZONAS ÁRIDAS- y 4 -RESPUESTA TÉRMICA DE CUBIERTAS VEGETADAS -estructurado en dos apartados: A- Ensayos experimentales y b-Predicción del microclima urbano y edilicio. Esto se debe a que estos dos capítulos son los que desarrollan las diferentes etapas del trabajo experimental, con toma de datos, su posterior tratamiento estadístico, análisis de resultados y conclusiones de los mismos.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

RESUMEN

Una de las estrategias dirigidas a garantizar la sustentabilidad del medio construido lo constituye el enverdecimiento urbano, es decir, la incorporación de espacios verdes en las ciudades. En las últimas décadas han surgido nuevas tecnologías como las “cubiertas vegetadas” asociadas a la necesidad de aumentar la relación territorial verde-construido en ciudades consolidadas. Si bien las cubiertas vegetadas han alcanzado un grado de madurez y desarrollo suficiente, su implementación masiva en zonas áridas presenta limitantes asociadas a la restricción del recurso hídrico, principal insumo de los espacios verdes. El presente capítulo introduce en la incorporación de vegetación, en particular, el estudio de cubiertas vegetadas, con el objeto de explicar el potencial de incorporación en zonas áridas y su rol como regulador energético-ambiental. Se persigue garantizar la sustentabilidad del modelo de desarrollo urbano imperante en las ciudades del centro-oeste de Argentina.

Sostenibilidad ambiental de las ciudades

En las últimas décadas las ciudades han experimentado un marcado crecimiento como consecuencia directa de la alta tasa demográfica y de la transformación de las estructuras económicas, que condujeron al abandono de áreas rurales y a la elevada concentración de la población en los asentamientos urbanos. Estos procesos de densificación urbana han sido acompañados de una disminución significativa de espacios verdes tradicionales impactando -entre otros- en el incremento de la temperatura urbana, en los consumos energéticos para refrigeración de los espacios privados y en las condiciones de confort de los usuarios en los espacios públicos (Giridharan et al., 2005; Permpituck y Namprakai, 2012). Estos cambios ocasionados en la temperatura de la ciudad conocidos como “isla de calor urbana” se encuentran vinculados a otro fenómeno, la “isla de contaminación urbana”; y ambos deben estudiarse simultáneamente para lograr una mejor comprensión y posibilidad de mejora del entorno urbano (Li et al. 2018). La “isla de contaminación urbana” es producto principalmente de la liberación de gases emitidos por los transportes, la producción de energía eléctrica, la incineración de residuos, el consumo de combustibles industriales y hogareños, y los procesos industriales. Estos fenómenos se han acelerado como consecuencia del crecimiento urbano que de este modo no ha seguido un desarrollo sostenible.

El concepto de desarrollo sostenible es definido por la Comisión Brundtland como “el desarrollo que permite satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las generaciones del futuro para atender sus propias necesidades” (Bermejo, 2014). Desde el punto de vista de la sostenibilidad urbana, el crecimiento de las ciudades debe tener en cuenta la materialidad de la envolvente edilicia y de los canales urbanos; los espacios verdes disponibles y los hábitos de los usuarios; dado que los mismos deben girar en torno a criterios rigurosos en los que se priorice un equilibrio entre ambiente natural y construido que perdure en el tiempo y que mejore la calidad de vida de los habitantes. En consecuencia, fortalecer la presencia de espacios verdes que aportan numerosos servicios ecosistémicos es un imperativo para moderar los efectos del incremento de la temperatura y de la contaminación del aire en las ciudades.

Desde los años 70 surge a nivel internacional una especial preocupación por el problema ambiental de las ciudades, y con ésta, la intención de lograr una aproximación a las áreas urbanas a partir de la observación de patrones y principios ambientales de los ecosistemas silvestres. Años después se generó un interés por incrementar la naturalidad del ambiente urbano, que condujo en los años 90 a una visión de la ciudad desde bases ecológicas. Junto a esta tendencia toman importancia términos como “sostenibilidad”. Algunas características que definen a una ciudad ambientalmente sostenible son: la conservación de los ecosistemas silvestres en su interior y en su alrededor; el uso apropiado de los recursos naturales; la conservación y utilización racional de los recursos hídricos; la planificación de los espacios verdes; la existencia de diversidad biológica; la equidad social y económica de la población, entre otras. Todas estas características deben estar encaminadas a evitar que los ecosistemas urbanos sobrepasen su capacidad de carga y pierdan su resiliencia, para lograr así una verdadera sostenibilidad (Rodríguez et al. 2008).

La sostenibilidad ambiental como paradigma de desarrollo plantea controlar el deterioro del medio urbano a partir de la consideración de un conjunto de principios. Entre ellos, el

enverdecimiento urbano (*urban greening*) como estrategia de mitigación de la artificialización del medio natural y mejora de las condiciones ambientales y de habitabilidad del espacio urbano-edificio constituye una estrategia básica que atenúa y controla los efectos negativos de la urbanización. Permite, además, el mejoramiento de la calidad de vida del habitante urbano y la consecución del desarrollo sustentable (Clarck & Matheny, 1998; Rosenfeld, et al., 1998; Santamouris, 2001; Jabareen, 2006).

Actualmente, se observa a nivel mundial un impulso para el desarrollo de tecnologías innovadoras apuntadas a enfrentar las crecientes necesidades en torno al uso racional de los recursos, la eficiencia energética y el aprovechamiento de los avances tecnológicos. La influencia antrópica sobre los distintos ambientes se ha incrementado, pero sólo en la última década se ha validado la responsabilidad a nivel de conciencia ambiental, que ha devenido en que numerosos países alrededor del mundo han comenzado a implementar tecnologías, manejos y gestiones tendientes a un desarrollo sostenible. Uno de ellos, es el uso de techos verdes como estrategia de enverdecimiento urbano, especialmente cuando no se dispone de vacíos urbanos para incorporar espacios verdes tradicionales -arbolado viario, parques o plazas- (Henk, 2016).

Cubiertas vegetadas

Los techos verdes antiguos más famosos fueron los Jardines Colgantes de Babilonia, construidos alrededor del 500 AC. En etapas posteriores, y en climas extremos, se ha tendido a cubrir techos con césped con el propósito de lograr un aislamiento térmico (Vijayaraghavan, 2016). Por tanto, la implementación de cubiertas vegetadas es una práctica utilizada desde hace siglos, tanto en ciudades de clima cálido del continente africano como en climas fríos de la zona de Escandinavia (Minke, 2009). Esto se debe a la funcionalidad que estas tecnologías de cubierta brindan en las distintas condiciones climáticas, almacenando calor en ambientes fríos y aislando espacios interiores de las altas temperaturas exteriores, en ambientes cálidos.

Esta tecnología, con un diseño constructivo adecuado -evaluado localmente y con funcionamiento comprobado en condicionantes regionales- puede resultar de sencillo mantenimiento y en ocasiones, relativamente económica (Pérez et al., 2012). Por lo cual, estas nuevas tecnologías verdes, permiten la incorporación de vegetación en superficies que se encuentran disponibles en las ciudades y que presentan potenciales desventajas para el metabolismo urbano si no son intervenidas como lo son las cubiertas expuestas y envejecidas de los edificios de las ciudades. Éstas, con una mínima intervención podrían ser rehabilitadas y transformarse para convertirse en mejoras constructivas a nivel edificio y en pequeños pulmones verdes a nivel urbano; otorgando servicios ecosistémicos con beneficios significativos para ambas escalas. Los techos verdes modernos, por lo tanto, que incorporan las bondades de técnicas antiguas; aprovechan los avances tecnológicos de la actualidad logrando tener mayor eficiencia, practicidad y potenciando los beneficios probados en la antigüedad (Vijayaraghavan, 2016). Es decir, otorgan servicios beneficiosos, a escala edilicia y a escala urbana, que son mensurables en ensayos experimentales y que permiten un diseño enfocado en las problemáticas locales de diferentes ciudades.

Los servicios ecosistémicos que prestan las infraestructuras verdes -entre ellos los techos verdes- pueden ser clasificados en cuatro grandes grupos: *soporte* -fotosíntesis,

producción primaria, ciclo de nutrientes, ciclo del agua-, **regulación** –regulación de clima local y calidad de aire, infiltración y drenaje de agua, protección ante riesgos naturales, polinización, control de plagas y enfermedades, descomposición de compuestos orgánicos, reducción del ruido, regulación de O₂ y CO₂, secuestro de carbono y provisión de hábitat, etc.-, **provisión** -cultivos, alimentos, medicamentos, bioquímicos, recursos genéticos, etc.- y **culturales** -recreación, ecoturismo, patrimonio y diversidad cultural, patrimonio natural y biodiversidad, valor educativo, integración social, salud mental y física de las personas, entre otras- (Vásquez, 2016).

Respecto a los aportes de las cubiertas vegetadas en la regulación del clima, la literatura internacional muestra que son una herramienta de mitigación de la isla de calor (Susca et al., 2011); permiten alcanzar reducciones de temperatura del aire interior entre 0,8 °C y 3.0 °C, dependiendo del clima (Zhao et al., 2014), mejoran la tecnología edilicia (Savio et al, 2006; Figueroa, 2009; Smith & Roeber, 2011; Qiu et al, 2013), y la tecnología que conforma el sistema biológico -espesor de sustrato y tipo de especie- (Eksi et al., 2017). Adicionalmente, disminuyen la demanda de energía para alcanzar condiciones de confort. Morakinyo et al. en 2017 observaron un rango de ahorro energético que varía entre 0.1 y 5.2%, en climas cálidos y secos, en verano. Dicho rango es variable en función del clima, la densidad edilicia y la tecnología de cubierta vegetada –tipo intensivo, semi-intensivo, o extensivo-, mostrando mayor eficiencia las cubiertas de tipo semi-intensivo. Las características de ahorro de energía, aislamiento térmico, sombreado y evapotranspiración resaltan el papel clave de los techos verdes en el rendimiento térmico general de los edificios y las condiciones microclimáticas de los ambientes interiores (Tang & Qu, 2016). En verano, el flujo de calor a través del techo del edificio puede reducirse en aproximadamente un 80% mediante la incorporación a través de los techos verdes (Karteris et al. 2016). Por lo tanto, el consumo anual de energía disminuye debido a una pequeña diferencia entre la temperatura del aire interior y la exterior (Bevilacqua et al., 2016).

Respecto al mejoramiento de la calidad del aire, las infraestructuras verdes urbanas generan procesos de deposición en seco para disminuir la contaminación del aire, almacenando y secuestrando carbono y liberando polen y esporas de hongos. Además, en forma indirecta, la vegetación regula la calidad del aire -a través de emisiones de compuestos orgánicos volátiles biogénicos- generando beneficios asociados a la disminución de la contaminación y su consecuente impacto en la regulación del clima -debido a la modificación de los flujos de aire- y de los consumos de energía, lo cual deriva también en la disminución de la emisión de CO₂ (Wang et al. 2014).

Por lo tanto, los numerosos beneficios que aporta esta tecnología remiten a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, la contaminación del aire y los efectos de las islas de calor urbano en áreas altamente pobladas. También permiten minimizar los riesgos de inundación al retener el exceso de agua, proporcionan un mejor hábitat ecológico para la vida urbana y la vida silvestre, permiten mitigar la contaminación acústica urbana y a nivel edilicio, mejoran la durabilidad de las membranas de la cubierta (Coma et al., 2016; Bevilacqua et al., 2016; He et al., 2016; Tang & Qu, 2016; Karteris et al., 2016). Otro beneficio de los techos verdes es la mejora del interés arquitectónico y la biodiversidad (Castleton et al., 2001) como también pueden mejorar la salud y el estado psicofísico de los habitantes de la ciudad.

A nivel internacional hay países pioneros que promueven esta tecnología. Se considera que Alemania es el país que más ha desarrollado la implementación de techos verdes en sus zonas urbanas, integrando profundamente ese desarrollo con su gestión y política administrativa, tanto a nivel municipal como nacional. Francia, es también uno de los países que más ha avanzado en esta temática, declarando en 2015 que los techos de los edificios nuevos en las zonas comerciales tendrán que estar parcialmente cubiertos por paneles solares o vegetación. En el continente americano, en el año 2009, Toronto, Canadá, adoptó una ley que obliga a los edificios residenciales e industriales a cubrir sus techos con vegetación, sin excepción. Estados Unidos, también encabeza la implementación de esta estrategia, citando, por ejemplo, el techo del centro comercial “Vallco Shopping Mall” sobre el cual se proyecta construir un parque sobre el edificio, el cual sería el techo verde más grande del mundo (Henk, 2016).

En el contexto internacional se han desarrollado certificaciones que promueven el uso de esta tecnología, como las certificaciones “LEED”, Leadership in Energy and Environmental Design (liderazgo en energía y diseño ambiental), las cuales conforman un reconocido programa de certificaciones de edificios verdes. Desarrollado por el USGBC, United States Green Building Council (Consejo de construcción verde de los Estados Unidos), se basa en un sistema de rangos que tienen en cuenta el diseño, la construcción, la operación, y el mantenimiento de los edificios verdes. Este sistema de rankings (certificado, plata, oro, y platino) se conoce como LEED Standards (Estándares LEED) y tiene en cuenta los siguientes aspectos: (1) reutilización de materiales de construcción, incorporando cuando se pueda tierra y vegetación; (2) limpieza y reciclaje de agua; (3) eficiencia y diversificación de la energía y sus fuentes; (4) uso de materiales deseables y sustentables; y (5) calidad interior del ambiente (Argentina Green Building Council, 2018). Como las cubiertas vegetadas generan un aporte significativo para cada uno de estos aspectos, su implementación en obras; y edificios públicos y privados sirve como un incentivo importante para su incorporación a un proyecto, debido a esto, en algunas ciudades se otorgan beneficios impositivos o brindan ayuda económica si se los incluye, o incluso los consideran en las certificaciones LEED como requerimiento para la construcción. El Seattle Green Factor (factor verde de Seattle) es otro sistema de ranking que fomenta el uso de manejos sustentables en construcciones, en este caso enfocado a edificios en la ciudad de Seattle. En Europa, la EEB, o European Environmental Bureau (Oficina Ambiental Europea) es la federación más grande de organizaciones medioambientales de Europa, con más de 150 organizaciones en más de 30 países. Esta federación estudia, concientiza, y desarrolla un gran panorama de temas sustentables, y su foco está en la creación y protección de las leyes medioambientales. Lo que tienen en común todos estos programas mencionados son sus principios ecológicos y la importancia que le otorgan al ofrecimiento activo de incentivos para el uso de manejos sustentables, como lo son las cubiertas vegetadas (Henk, 2016).

En consecuencia, en los países desarrollados el nivel de penetración de las tecnologías verdes es significativo y en la actualidad en Argentina, su estado de desarrollo y aplicación es aún incipiente. En los últimos años se ha avanzado a nivel legislativo con el objeto de implementar “Techos o Terrazas Verdes”: la Ley N° 4.428 (2012) en el ámbito de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires y la Ordenanza N° 12548 (2017) aprobada por el Consejo Deliberante de la Ciudad de Córdoba. Además, se han elaborado programas, documentos y aplicaciones en obras emblemáticas. Ejemplo de ellos son, el programa

“Terrazas Verdes” desarrollado en el ámbito de la subsecretaría de Medio Ambiente de la Municipalidad de Rosario (Ordenanza N° 8.208, 2007), el documento que promueve su implementación en la ciudad de Buenos Aires (Agencia de Protección Ambiental APRA, 2009) y el proyecto de ampliación del Museo de Arte Moderno de Buenos Aires (Ambasz, 2012). En el ámbito privado han surgido empresas de gran envergadura dedicadas a la construcción y mantenimiento de los techos verdes en la Ciudad de Buenos Aires (Green Roof Argentina, Green Tec, GWall y Eco Cubiertas) y en el interior del país, Soluciones Constructivas en la provincia de Mendoza y MASDAR en la provincia de Córdoba, entre otras.

La construcción de las cubiertas vegetadas admite varios tipos constructivos, de modo de adaptarse a la estructura edilicia ya existente. Sin embargo, existen ciertos componentes estructurales que todos los techos verdes tienen en común y constan de capas o láminas con componentes específicos (Pérez, 2012). Las distintas capas que generalmente se indican como componentes son; la vegetación (materiales del paisaje), el medio de cultivo (sustrato), el filtro, los elementos de drenaje (retención de humedad) y capas de protección -la barrera de raíces, un material aislante, la membrana hidrófuga y la cubierta estructural del edificio- (Figura 1) (Vijayaraghavan, 2016; He et al., 2016). Se observan además algunos componentes adicionales que dependen de las condiciones climáticas, caso de los sistemas de riego (Castleton et al., 2001). Los sistemas de riego son necesarios para las regiones cálidas y áridas, mientras que son prescindibles para los climas húmedos y templados. Los techos verdes se pueden dividir en tres categorías (techos extensivos, semi-intensivos e intensivos) según el peso final de la tecnología, la capa de sustrato, el mantenimiento, el costo, el tipo de plantas a emplear y el riego (Figura 2) (Pisello et al., 2015). Los techos intensivos, además de requerir mayor mantenimiento, resultan más pesados y más costosos en comparación con los otros dos tipos. Los techos extensivos registran un mínimo peso adicional sobre la cubierta debido al acotado espesor del sustrato de crecimiento (60 a 200 mm) y su costo de mantenimiento es notablemente bajo (Coma et al., 2016). Sustratos de mayor profundidad ofrecen mejor oportunidad de crecimiento a la vegetación.

Los techos verdes convierten las áreas impermeables de un techo en espacios multifuncionales con medios de cultivo y vegetación (Karteris et al., 2016). Por esta razón, los techos verdes se utilizan ampliamente para recrear el espacio en áreas urbanas (Coma et al., 2016; He et al., 2016). Al utilizar la vegetación local y el medio de cultivo, los requisitos de riego y costos de mantenimiento pueden reducirse como consecuencia de las condiciones climáticas locales (Bevilacqua et al., 2016).



Figura 1: Esquema de diferentes componentes de cubierta vegetal. Fuente: Vijayaraghavan, 2016.

CUBIERTA VEGETADA			
	<i>Extensiva</i>	<i>Semi-intensiva</i>	<i>Intensiva</i>
			
Mantenimiento	Bajo	Periódico	Alto
Riego	No	Periódico	Regular
Tipos de vegetación	Musgos, <i>Sedum</i> , herbáceas y cespitosas	Herbáceas, cespitosas y arbustos.	Céspedes o plantas perennes, arbustos y árboles
Costo	Bajo	Medio	Alto
Peso	60-150 kg/m ³	120-200 kg/m ³	180-500 kg/m ³
Uso	Cubierta ecológica de protección	Cubierta vegetal diseñada	Parques y jardines
Espesor del sistema	60-200 mm	120-250 mm	150-400 mm

Figura 2: Tipos de cubierta vegetal. Fuente: Vijayaraghavan, 2016.

En cuanto a la selección de especies vegetales, se recomienda utilizar aquellas que sean nativas o endémicas del área, ya que gozan de una resistencia natural a los diferentes agentes ambientales adversos tales como condiciones climáticas, presencia de plagas, y competencia contra malezas (Minke, 2009). Se busca que las características en común que debieran tener las plantas sean: alto poder regenerativo, resistencia/tolerancia a adversidades climáticas como estrés térmico o falta de agua, tamaño relativamente

pequeño y poco desarrollo radical. Para cada área hay una lista de especies ideales, por lo que la elección depende mucho de la zona.

Cubiertas vegetadas en ciudades de zonas áridas

Las tierras áridas abarcan tanto las tierras áridas y semiáridas, como las áreas más desérticas (hiperáridas). Estas tierras se caracterizan por una baja y errática precipitación que se refleja en niveles de producción agrícolas y pecuarios relativamente bajos y ampliamente impredecibles. Típicamente las tierras áridas reciben menos de 200 mm anuales de lluvia en invierno o menos de 400 mm de lluvias de verano, mientras que las zonas semiáridas reciben entre 200 y 500 mm de lluvias en invierno o 400 a 600 mm en verano. Sin embargo, la característica principal de su sequedad radica no tanto en la precipitación sino en el balance hídrico negativo entre la precipitación y la evapotranspiración. Las tierras áridas se definen como áreas donde la precipitación media anual es menor que la mitad de la evapotranspiración potencial. En términos globales, las tierras áridas del mundo en desarrollo suman en total unos 20 millones de km², sustentando una población cercana a los 430 millones de habitantes para el año de 1975. Desde 1975, las poblaciones deben seguramente haber aumentado en más de un 15 por ciento. Actualmente, con una población aproximándose a los 500 millones de habitantes, sería irresponsable concluir que no existe un problema de presión demográfica. El término “tierras áridas” hace énfasis en la disponibilidad de humedad más que en el clima per se, aunque aproximadamente pueden compararse con el concepto de climas áridos y húmedos. Las tierras áridas abarcan los climas semi-áridos, áridos e hiperáridos (desiertos), mientras que las tierras bien-humedecidas abarcan los climas sub-húmedos, húmedos e hiper-húmedos. Los climas secos sub-húmedos ocupan un lugar medio y deben mejor mantenerse en esa posición, para ser incluidos o excluidos de su categoría dependiendo de las circunstancias. En realidad, en esta clasificación, no existe una línea definitiva para separar las áreas donde el agua llega a ser bruscamente una limitación o no, de manera que muchas de las estrategias para el desarrollo de las tierras áridas se podrán aplicar a las zonas secas sub-húmedas (FAO, 2007).

Las regiones áridas y semiáridas se distinguen por sus valores de precipitación anual e incluyen: (i) Desiertos con una precipitación total anual de menor de 50 mm, encontrándose desprovistos de vegetación; (ii) Regiones áridas con una precipitación de 50- 250 mm/año, por lo que la cobertura vegetal resulta ser muy escasa, y (iii) Regiones semiáridas con una precipitación total de 250-500 mm/año y vegetación tipo estepa/sabana/pradera/pampa. La mayoría de los desiertos y regiones semiáridas se ubican entre los 10° y 35° de latitud (por ejemplo, los desiertos del Sahara y Kalahari), en los espacios geográficos interiores de los continentes (ejemplo, Australia y el Desierto de Gobi). Grandes partes de la tundra ártica también reciben una precipitación inferior a los 250 mm/año, por lo que son considerados ambientes áridos (Figura 3).

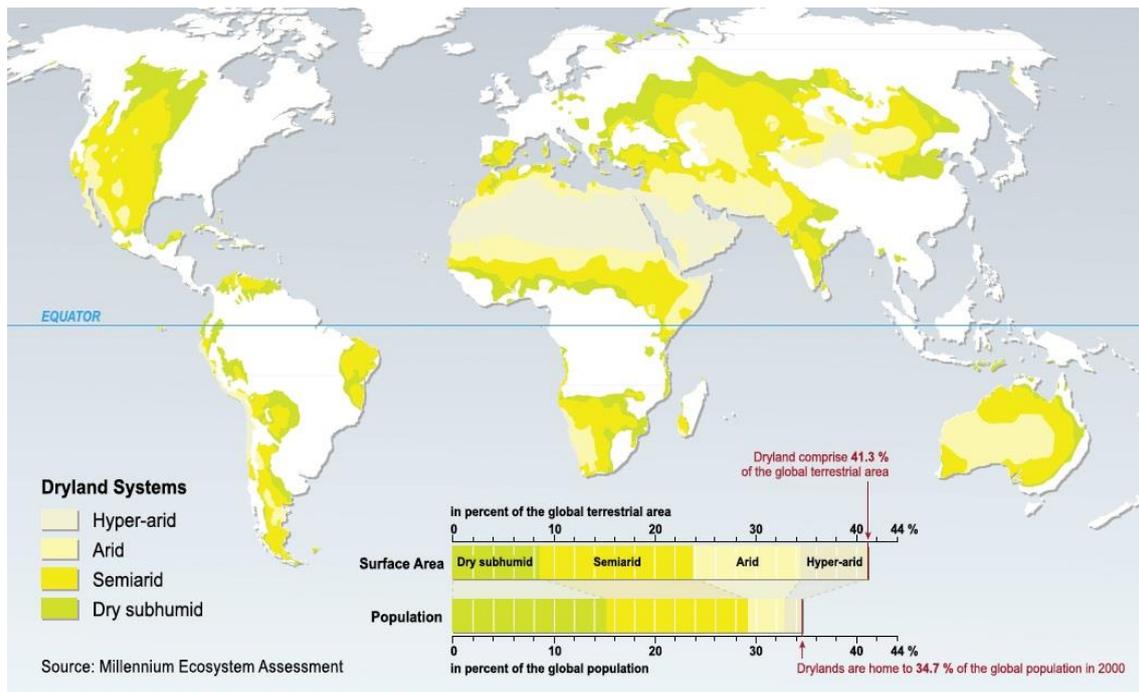


Figura 3: Regiones Desérticas, Áridas y Semiáridas del Mundo. Fuente: OceanWorld,tamu.edu

En ambientes áridos y semiáridos, el balance hidrológico resultante es una situación de déficit hídrico permanente, debido a la baja precipitación y elevada evapotranspiración (Wilcox et al. 2003, Newman et al. 2006). En tales ecosistemas se espera que en los primeros metros del suelo la evaporación supere todos los ingresos de agua pluvial, evitando la percolación y drenaje profundo del agua. Lógicamente, esto trae consecuencias sobre la productividad y biodiversidad que puede mantener el sistema y determina respuestas ecológicas en los seres vivos que tienden a maximizar la utilización y conservación del agua (Villagra et al. 2011). Las plantas ejercen una fuerte influencia sobre la dinámica del agua a través de sus diferencias en la capacidad para acceder, transportar y evaporar la humedad edáfica. Por ello, la composición y distribución de las plantas son de importancia fundamental en la regulación del balance hídrico mediante el control de la humedad del suelo y generación de escorrentía (Jackson et al. 2000, Gutierrez & Squeo 2004).

Por lo cual, el principal factor limitante en zonas de clima árido y semiárido es la disponibilidad de agua. La cantidad y disponibilidad estacional del agua son primordiales para la distribución y la supervivencia a largo plazo y para la distribución de las plantas. Tradicionalmente, la clasificación de zonas áridas, semiáridas y húmedas se basaba sólo en la precipitación anual media (Lloyd, 1986). En la actualidad, esta clasificación se realiza en base a la relación entre la precipitación y la evaporación. Las zonas áridas y semiáridas se caracterizan por tener una relación entre precipitación media anual y evapotranspiración potencial inferior a 0,65 (UNEP, 1997). Esto indica una descompensación entre la cantidad de agua que potencialmente puede pasar a la atmósfera por evapotranspiración y la cantidad de agua de lluvia efectiva que reciben estas zonas. Estas regiones presentan una demanda evaporativa atmosférica elevada que depende fundamentalmente de la radiación solar, la presión de vapor del aire y la velocidad del viento; por ello, en la mayoría de los casos, la evapotranspiración está limitada por la disponibilidad de agua en el suelo frente a la demanda atmosférica. Por lo demás, el

régimen de precipitaciones se caracteriza por una alta irregularidad tanto espacial como temporal, agravando aún más la problemática, en ocasiones, con tormentas de alta intensidad que descargan la mayor parte de la lluvia anual en un breve periodo de tiempo. Durante la mayor parte del tiempo, las bajas precipitaciones y las altas tasas de evapotranspiración dan lugar a flujos de agua de pequeña magnitud, pero de una gran importancia para el comportamiento del sistema. Hay también otras características ambientales propias de este tipo de zonas, como son: altos niveles de radiación solar incidente, variaciones amplias de temperatura durante el día y la noche, fuertes vientos, altas tasas de arrastre de sedimentos, así como importantes pérdidas de agua por infiltración en canales aluviales (Fernández Gálvez, 2010).

Una barrera importante para la aplicación generalizada de techos verdes extensivos y semi-extensivos en zonas áridas y semi-áridas es la escasa oferta de especies vegetales que tengan una capacidad probada de sobrevivir y poseer valor estético en las condiciones climáticas locales. Para sobrevivir en los techos verdes, las plantas deben adaptarse al déficit de calor, frío, sol, viento y agua, y ser tolerantes a algunas situaciones eventuales de inundación que afecte la zona de raíces (Snodgrass y Snodgrass, 2006). De acuerdo a las exigencias climáticas, en zonas más hostiles de crecimiento para las plantas, se requerirá mayor tolerancia a períodos más largos y más extremos de estrés por déficit de agua (Williams et al., 2010). Además, la implementación de cubiertas vegetadas impone desafíos derivados del establecimiento y permanencia de la vegetación a largo plazo, debido a la amplitud térmica diaria y estacional (Boivin et al., 2001; Eumorfopoulou y Kontoleon, 2009; Ouldboukhitine et al., 2012), la exposición al viento, y la intensa radiación solar que constituyen entornos hostiles para el crecimiento de las plantas (Schwarz, 2005; Nagase et al., 2010).

Hasta la fecha, la flora más exitosa para techos verdes extensivos consiste en plantas suculentas y de hojas carnosas, particularmente las del género *Sedum* (Durhman et al., 2007; Snodgrass y Snodgrass, 2006). Los *Sedum* spp. son plantas suculentas con la capacidad de habilitar la vía del metabolismo del ácido crasuláceo (CAM) cuando están estresados por sequía. En contraste con las vías metabólicas de las plantas denominadas C3 y C4, y las plantas con metabolismo CAM abren sus estomas y absorben CO₂ atmosférico durante la noche, coincidiendo así con las demandas mínimas de evapotranspiración (Ting, 1985). Además, la asimilación de CO₂ a carbohidratos ocurre durante el día con los estomas cerrados (Borland y Dodd, 2002).

Sin embargo, dependiendo de la especie y del estrés debido al ambiente, las plantas se pueden clasificar en ciclo de CAM obligatorio o de forma simultánea, mientras que la amplitud del propio ciclo de CAM puede variar según las especies, su etapa de desarrollo y las condiciones ambientales (Winter & Smith, 1996). El metabolismo de CAM ha contribuido a que *Sedum* sp. sea considerada como una de las especies más prometedoras para un techo verde extensivo con un mantenimiento mínimo y mayor tolerancia a las diversas condiciones de estrés debido a los condicionantes ambientales que imponen los techos. Aparte de sus reducidas demandas de transpiración, las especies de *Sedum* se consideran la opción preferida para los techos verdes extensivos debido a varias otras capacidades que incluyen un sistema radical no agresivo y su capacidad para sostener el crecimiento en sustratos poco profundos (Durhman et al., 2007).

Por otra parte, es conocido que las plantas nativas están adaptadas al entorno en el que evolucionaron y, como resultado, requerirían menos mantenimiento (agua, fertilizantes, control fitosanitario) que las plantas exóticas introducidas de otras zonas geográficas. Numerosos autores destacan la importancia de la elección de especies aptas a ecosistemas urbanos -tanto autóctonas como introducidas- y su capacidad de adaptación a recursos hídricos limitados, mediante el conocimiento de su comportamiento y el uso apropiado de distintas especies (Ambrosetti, 1971; Roig, 1987; Schulte et al., 1992; Carrieri et al., 1996; Dalmasso, 2010). Se han encontrado algunos trabajos científicos que estudian las respuestas de especies nativas o introducidas y adaptadas regionalmente, aplicadas a cubiertas vegetadas, no obstante, la profundización de su uso a nivel local es limitado (Blanusa et al., 2013). Monterusso et al. (2005) evaluaron 20 especies de plantas nativas, incluidas dos especies del género *Sedum*, para determinar su capacidad de establecimiento cuando se colocaron sobre tres sistemas de drenaje comerciales diferentes. Demostraron que los *Sedum* ssp. y cuatro especies de plantas nativas pudieron sobrevivir sin irrigación cuando se aplicó el estrés por sequía en el segundo año de estudio. Estas especies, debido a su mejor adaptación a las condiciones ambientales locales de aridez, otorgan un potencial de incorporación a esta tecnología en techos, con la ventaja de que tendrían un bajo consumo hídrico.

Área de estudio

La ciudad de Mendoza está situada al pie de la cordillera de los Andes, zona centro oeste de Argentina (32°40' latitud sur, 68°51' longitud oeste, y 750 m sobre el nivel del mar). Es un conglomerado urbano con una población de más de un millón de habitantes, inserto en un clima continental semiárido con bajos porcentajes de humedad relativa atmosférica y alta heliofanía. El sitio se encuentra en un contexto árido y sísmico, con un índice de aridez entre 0.20 a 0.50 (índice de aridez = precipitación/potencial de evapotranspiración) de acuerdo a los mapas de peligro de desertificación del Centro-Occidental Argentina (Roig et al., 1991; Atlas climático de la República Argentina, 2010) (Figura 4).

El “Área Metropolitana de Mendoza” (AMM), también denominado “Gran Mendoza” está formada por seis de los principales departamentos de la provincia (Capital, Godoy Cruz, Guaymallén, Las Heras, Lujan y Maipú) y se encuentra situada al en el Oasis Norte de la provincia. Tiene una superficie de 368 Km², con más de 1,086 habitantes es la cuarta aglomeración de la República Argentina (después de Buenos Aires, Córdoba y Rosario) (Censo Poblacional 2010). Su población aumenta en el AMM, a razón de un 2 % por año, un aumento poblacional mayor que Córdoba y Rosario, por lo que en el futuro Mendoza podría convertirse en la segunda mayor ciudad de Argentina (Gobierno de la Provincia de Mendoza, 2013). Este incremento poblacional ha derivado en un crecimiento horizontal y vertical con escaso ordenamiento y planificación territorial.

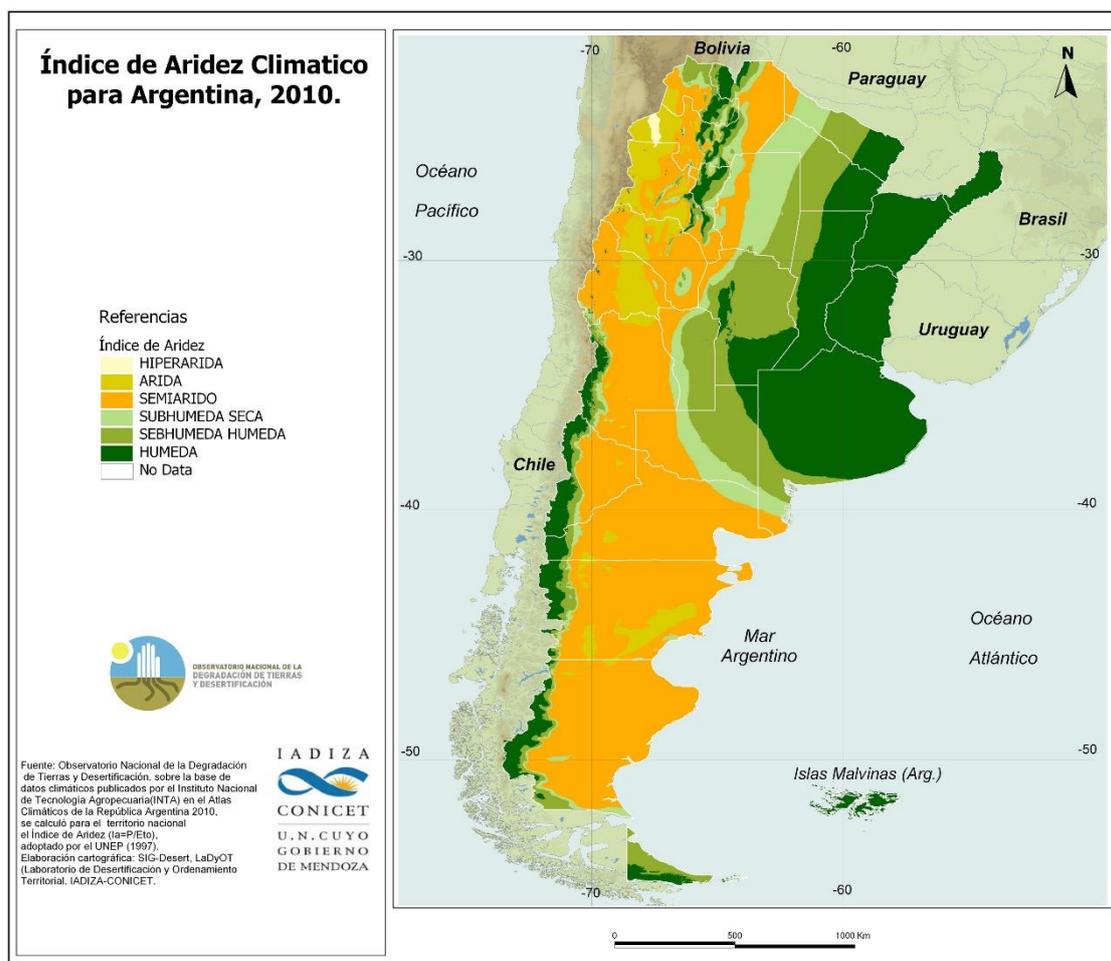


Figura 4: Ubicación geográfica del área de estudio e índices de aridez. Fuente: IADIZA 2010.

Como ocurre en el conjunto de los asentamientos humanos de la región andina, esta ciudad y el territorio circundante han desarrollado una cultura de oasis. El beneficio de esta configuración urbana se basa en modificar ambientalmente un sector de desierto, transformándolo en un lugar de condiciones excepcionalmente aptas para la vida del hombre y sus actividades económicas y sociales. Ello se consigue mediante una macro estructura espacial, de tipo natural, que consta esencialmente de una red de riego artificial y un entramado arbóreo superpuesto al conjunto de edificación y trazado urbano.

En el caso de la ciudad de Mendoza, la sustentabilidad del modelo urbano desarrollado se fundamenta en la implantación de una importante matriz forestal que acompaña los límites de las manzanas e integra numerosas áreas verdes de uso público y privado (parques, plazas, jardines y patios). El desarrollo en el tiempo de esta matriz ha creado verdaderos túneles verdes, generados por la continuidad de las copias de los árboles, dando las características de un auténtico bosque dentro de la ciudad (Martinez, 2011). En este sentido, las cualidades que aporta la vegetación como elemento de costura de la diversidad edilicia y sus beneficios energético-ambientales debido al carácter desértico del paraje natural en el que se emplaza la ciudad, son reconocidas y valoradas a nivel local e internacional como únicos y han merecido la calificación de la ciudad como “ciudad oasis” (Bórmida, 1984). Cuando el análisis se centra en este indicador, las estrategias de conservación del ecosistema urbano se orientan hacia la búsqueda de alternativas que promuevan un balance adecuado entre crecimiento, dinámica y estructura

urbana, y una alta eficiencia de utilización de los recursos y funciones ambientales que ofrecen los sistemas biofísicos de la ciudad.

Sin embargo, en este último siglo en Mendoza se ha tendido a distorsionar su sistema de oasis al ritmo de sus rápidas transformaciones, que siguen modelos foráneos y teorías inapropiadas sin ejercer una reflexión crítica a partir de su propia identidad ciudadana (Bórmida & Dabul, 1997). El proceso constante de crecimiento urbano del AMM y en particular, las reformas recientes a los códigos de edificación de los municipios de Capital y Godoy Cruz, hacen prever un impacto significativo en la densificación del tejido urbano, con implicancias en la reducción de los espacios abiertos vegetados.

Desde el punto de vista de la sustentabilidad del modelo urbano de una “ciudad oasis” inserta en un ecosistema de alta vulnerabilidad, el crecimiento de la edificación debe ser acompañado de una mayor presencia de espacios verdes (Bórmida, 1984). A los efectos de mantener el equilibrio entre espacio abierto y vegetado se debe tender a alcanzar índices que se aproximen a los recomendados internacionalmente (1:4) (Panasiti, 2000). La Organización Mundial de la Salud (OMS) a principios de los años 90 estableció estándares recomendados que relacionan la superficie de áreas verdes con los habitantes que hacen uso de ella. De esta forma, establece un umbral mínimo de 9 m²/habitante y óptimo de 15 m²/habitante.

Si se tiene en cuenta que en los últimos 20 años el área urbanizada del AMM se ha incrementado en un 16,57% en relación a un crecimiento del 1.1% de los espacios verdes (Informe Gestión de la Urbanización en Ciudades Turísticas, realizado por la Provincia y la Comunidad Europea 2006), y la baja proporción de vacíos urbanos en las tramas consolidadas, las alternativas de incremento de “verde” están asociadas al desarrollo de nuevas tecnologías para su incorporación a techos y paredes a modo de cubiertas verdes. El diseño y la incorporación de tecnologías verdes apropiadas a zonas áridas constituyen una estrategia para el desarrollo urbano-edificio sustentable.

Durante la etapa inicial de esta tesis se encontró que en las zonas de alta densidad constructiva del AMM se cuenta con un bajo porcentaje promedio de espacio abierto (13%), en relación al espacio cubierto (87%) (Flores Asin et al., 2013). Del total de la superficie cubierta, el 61% corresponde a techos planos, lo que indica una alta disponibilidad para la potencial incorporación de cubiertas verdes. Además, se encontró una baja proporción de espacio abierto o presencia de vacíos urbanos. Esta situación indica que no existe posibilidad de aumentar los espacios verdes si no es mediante la incorporación de nuevas tecnologías tales como muros o techos verdes. El ajardinado de techos, por lo tanto, representa una estrategia viable para la incorporación de vegetación al ambiente construido en el AMM (Figura 5).

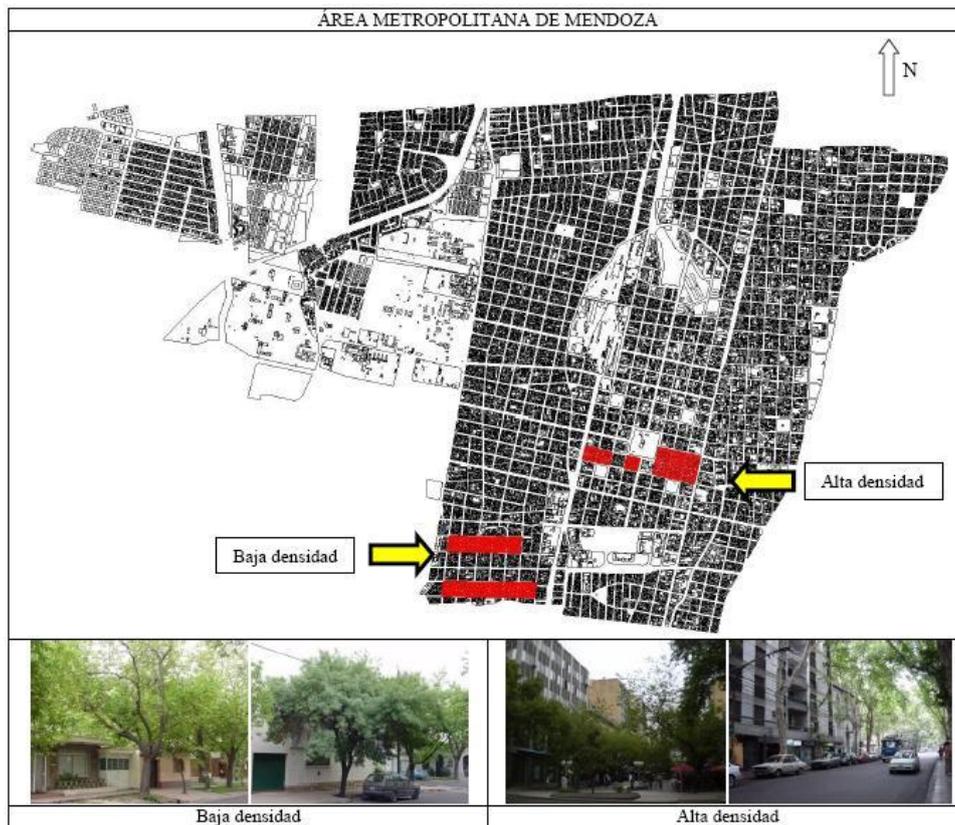


Figura 5: Área de estudio seleccionada. Fuente: Flores Asin et al., 2013.

El análisis realizado permite concluir que el potencial de incorporación de nuevas tecnologías verdes –cubiertas vegetadas– en el AMM es elevado en la alta densidad (61%) y más restringido en baja densidad constructiva (36%). Sin embargo, dado que esta última se corresponde con áreas residenciales, presenta mayor disponibilidad de superficie abierta (40%) para la aplicación de estructuras verdes tradicionales (patios ajardinados, forestación de calles, plazas). Por tanto, el ajardinado de techos representa una estrategia viable para la incorporación de vegetación al ambiente construido (Flores Asin et al., 2013).

HIPOTESIS

El diseño y la incorporación de nuevas tecnologías verdes -cubiertas vegetadas- apropiadas a ciudades de zonas áridas constituye una de las estrategias para el desarrollo urbano-edilicio sustentable, que contribuye a fortalecer las condiciones ambientales del oasis con los beneficios que aporta el enverdecimiento urbano y a disminuir los consumos energéticos a escala micro -edilicia-.

OBJETIVOS

Objetivo general

Proponer diseños y tecnologías eficientes e innovadoras para aumentar el enverdecimiento urbano y edilicio mediante la incorporación masiva de cubiertas vegetadas que garanticen el equilibrio entre ambiente natural y construido en medios urbanos insertos en zonas áridas, integrando los servicios ecosistémicos y el comportamiento térmico de dichas cubiertas, a las estructuras construidas por el hombre en conglomerados urbanos.

Objetivos específicos

- Determinar el potencial urbano de incorporación de tecnologías verdes asociadas a la disponibilidad efectiva de azoteas y envolventes expuestas.
- Identificar sistemas y elementos vegetales que permitan controlar el entorno climático teniendo a la vegetación como su principal materia prima.
- Analizar y seleccionar especies vegetales apropiadas, de posible incorporación a los sistemas de naturación urbana.
- Medir las propiedades termo-físicas y ópticas de las distintas especies propuestas regionalmente para la resolución de la vegetación de los espacios.
- Diseñar tecnologías verdes factibles de implementarse masivamente en zonas áridas que minimicen los efectos derivados de la antropización del medio y contribuyan a mejorar las condiciones energético-ambientales a escala urbana y edilicia.
- Evaluar la eficacia y eficiencia de las distintas estrategias de diseño o tecnologías propuestas a fin de reducir el efecto de isla de calor a escala urbana y la antropización del entorno; y en la microescala, mejorar las condiciones de habitabilidad térmica de los espacios interiores bajo los condicionantes climáticos, topográficos e hídricos de las zonas áridas.
- Explorar y/o desarrollar herramientas computacionales que permitan evaluar, dimensionar y simular los distintos elementos y/o tecnologías vegetales de acondicionamiento ambiental.
- Generar, a través de la multidisciplinariedad, avances relevantes para el manejo y la planificación ambiental de las áreas urbanas, a fin de desarrollar pautas que puedan transferirse a los Códigos de edificación y a la normativa local. De este modo se proporcionaría un instrumento útil para una futura certificación urbano-edilicia.

CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES

RESUMEN

El análisis de tecnologías de techos verdes de adaptación local con componentes probados en ensayos experimentales, deben complementarse con trabajos de investigación que cuantifiquen los beneficios que otorga esta tecnología, haciendo hincapié en los servicios ecosistémicos de mayor potencialidad a nivel regional. De esta forma, se valoran los techos verdes por su adaptación a las limitantes de cada zona y por los servicios ecosistémicos que prestan a escala edilicia y a escala urbana. Esta alternativa tecnológica que permite aumentar el enverdecimiento urbano es viable y eficiente en términos energéticos y ambientales, su inserción en áreas urbanas puede mejorar el desempeño térmico de los edificios y en particular aumentar los beneficios ambientales del verde urbano. Contribuyen además a mitigar el fenómeno isla de calor, favorecer la biodiversidad dentro del ambiente urbano y la valoración socio-cultural al permitir un mayor contacto del ciudadano con la naturaleza; beneficios que redundan en un aumento de la salubridad humana y ambiental para las ciudades actuales.

Marco conceptual de antecedentes bibliográficos

Son numerosos los países que han avanzado en el campo científico respecto de la implementación de techos verdes a escala urbana (Vijayaraghavan, 2016). Blank et al. (2013) realizaron una encuesta sobre publicaciones de techos verdes que apareció en la base de datos de ISI Web of Science e identificaron que EE. UU. contribuyó con el 34% del total de publicaciones en techos verdes, mientras que los integrantes de la UE y Asia aportaron el 33% y el 20%, respectivamente. Los autores también indicaron que el ritmo y el número de publicaciones en esta temática aumentaron significativamente en comparación con lo publicado a principios del año 2000. Inicialmente, las investigaciones se centraron principalmente en evaluar o destacar los beneficios de los techos verdes (Del Barrio, 1998; Dominguez-Hernandez & Lozano-Martinez-Luengas, 1998). Recientemente, se ha tomado consciencia de que cada país con diferentes características climáticas y constructivas requiere investigaciones locales para identificar los componentes necesarios para el establecimiento exitoso de los techos verdes (Vijayaraghavan, 2016). Aparte del costo adicional, los sistemas de techos verdes comerciales de países occidentales podrían no estar completamente adaptados a cada contexto local (Wong & Lau, 2013). Por ejemplo, la vegetación o el sustrato utilizado en países escandinavos puede fallar como medio de cultivo en climas tropicales. Lo mismo se aplica a otros componentes del techo verde. Estos aspectos actuaron como fuerza impulsora, detrás del aumento en la investigación de techos verdes, con estudios recientes enfocados en identificar componentes nuevos o alternativos a los empleados, y de bajo costo para la implementación práctica de dichos techos (Vijayaraghavan & Raja, 2014; Graceson et al., 2014; Razzaghmanesh et al., 2014; Vijayaraghavan, 2016). Además, los techos verdes de adaptación local con componentes probados a través de ensayos experimentales, deben complementarse con mediciones que cuantifiquen los beneficios que otorga esta tecnología, haciendo hincapié en los servicios ecosistémicos de mayor potencialidad a nivel regional. De esta forma, se valoran los techos verdes por su adaptación a limitantes de cada zona y por los servicios que prestan a escala edilicia y a escala urbana. Esta alternativa tecnológica que permite aumentar el enverdecimiento urbano es viable y eficiente en términos energéticos y ambientales. Numerosos estudios muestran que estas tecnologías de vegetación insertas en áreas urbanas pueden mejorar el desempeño de los edificios y en particular aumentar los servicios ecosistémicos del verde urbano (Berndtsson, 2010). Contribuyen además a mitigar el fenómeno isla de calor (Susca et al., 2011), favorecer la biodiversidad dentro del ambiente urbano y, la valoración socio-cultural al permitir un mayor contacto del ciudadano con la naturaleza; beneficios que redundan en un aumento de la salubridad humana y ambiental para las ciudades actuales (Brenneisen, 2006; Oberndorfer et al., 2007). Esta tendencia en países europeos está ganando impulso en otros países por lo que se esperaría que adopten la incorporación de techos verdes en un futuro cercano (Vijayaraghavan, 2016). Por ello, es imperativo a nivel local avanzar sobre el estado del arte con el fin de lograr su aplicación en la región, atendiendo a los condicionantes propios. En el contexto árido del área de estudio, toman principal relevancia los antecedentes del comportamiento biológico, ecológico y termo-energético de las cubiertas vegetadas debido a la importancia del enverdecimiento urbano en una ciudad-oasis; los cuales aportan herramientas de base para generar estrategias para el desarrollo urbano-edificio sustentable, el cual contribuye a fortalecer las condiciones ambientales y a disminuir los consumos energéticos.

Comportamiento biológico y ecológico de cubiertas vegetadas

La implementación de las cubiertas vegetadas impone desafíos derivados del establecimiento y permanencia de la vegetación a largo plazo dadas las fluctuaciones de temperatura diarias y estacionales (Boivin et al., 2001; Eumorfopoulou y Kontoleon, 2009; Ouldboukhitine et al., 2012), la limitada disponibilidad de agua, la exposición al viento, y la intensa radiación solar que pueden propiciar entornos hostiles para el crecimiento de las plantas (Schwarz, 2005; Nagase & Dunnett., 2010). Debido a la naturaleza expuesta y propensa a la sequía de los techos verdes extensivos y semi-extensivos, el conjunto de especies vegetales del género *Sedum* con características típicas de adaptación a ambientes xerofíticos son el grupo de plantas más utilizado (Dunnett & Kingsbury, 2008). Pero los techos verdes modernos tienen un origen común europeo, donde su diseño atendía a la función principal de reducir la escorrentía de aguas pluviales. Tradicionalmente, estos techos fueron plantados con especies suculentas de sencilla propagación, crecimiento limitado y tolerancia a la sequía, especialmente del género *Sedum*. La habilidad de los *Sedum* sp. de establecerse rápidamente, proporciona una buena cobertura en la superficie de la cubierta y son eficaces para disminuir la escorrentía de aguas pluviales, además de requerir un bajo mantenimiento (Monterusso et al., 2005; Butler et al., 2012).

Estudios científicos en todo el mundo han investigado especies alternativas al género *Sedum*, incluidos bulbos y pastos en Alemania (Liesecke et al., 1997), arbustos pequeños, pastos y plantas perennes ornamentales en Japón (Sendo et al., 2010), mezclas de especies vegetales que incluyen suculentas en Canadá (Lundholm et al., 2010), y tres especies alternativas han sido probadas en las condiciones climáticas del Reino Unido (Dunnett & Nolan, 2004; Nagase & Dunnett, 2010; Blanusa et al., 2013). El enfoque de estos estudios ha sido la función ecológica, particularmente la supervivencia de las especies y las tasas de crecimiento. Los resultados mostraron que existían alternativas a *Sedum* en términos de una buena cobertura vegetal de la superficie y protección contra la escorrentía del agua, pero hubo poco énfasis en otros servicios ecosistémicos, incluido el potencial de enfriamiento (Blanusa et al., 2013). El tipo de planta y el hábito de crecimiento, definido principalmente por su especie influye en la temperatura del sustrato debajo de la cubierta debido a que condicionan los mecanismos de transferencia de calor, es decir, el potencial de enfriamiento de edificios (Eksi et al., 2017). Las temperaturas mínimas y las fluctuaciones de la temperatura, como el flujo de calor tienden a ser más estables debajo de un techo verde con plantas herbáceas (Eksi et al., 2017). La elección de las especies vegetales a incorporar en los techos verdes no debería ser determinada sólo por su supervivencia en sustratos poco profundos -sistemas extensivo- sino también por el mayor potencial de servicios ecosistémicos que ofrecen (Blanusa et al., 2013).

Debido a que una de las principales prioridades para la selección de plantas en techos verdes extensivos y semiextensivos ha sido la tolerancia al estrés hídrico y a las condiciones de crecimiento; y en segundo lugar la calidad estética de las especies vegetales, solo se ha prestado una atención limitada a la capacidad de cada especie para proporcionar enfriamiento. De hecho, se ha sugerido que *Sedum* y otras especies utilizadas actualmente (con adaptaciones morfológicas similares, como hojas pequeñas/estrechas/suculentas/con cutícula gruesa) probablemente no ofrezcan un enfriamiento evapotranspiratorio sustancial, especialmente cuando el clima es cálido y

seco (Getter & Rowe, 2006). Además, la disponibilidad reducida de contenido de agua para el sustrato, frecuentemente asociada con techos verdes, causa el cierre de los estomas de la hoja y el consiguiente calentamiento de la superficie de la hoja (Jones et al., 2002), pero es probable que la extensión de esta respuesta difiera entre las especies. Dependiendo del rendimiento o crecimiento expresado principalmente en cobertura vegetal, algunas especies menos tolerantes al estrés pueden justificar una mayor inversión requerida para apoyar su establecimiento y crecimiento en los techos, al proporcionar un mejor enfriamiento que las especies de techos verdes "tradicionales" (Blanusa et al., 2013). Las plantas nativas debido a su condición natural, están bien adaptadas al entorno en el que evolucionaron y, como resultado, requieren menos mantenimiento y tareas culturales (aporte de agua por riego, fertilizantes, aplicación de fitoquímicos) que las plantas exóticas introducidas de otras zonas geográficas (Butler et al., 2012).

Existe evidencia científica que confirma los efectos positivos de los techos verdes. Sin embargo, un experimento realizado por Hien et al., (2007) antes y después de construir un techo verde extensivo en la azotea sobre un estacionamiento de varios pisos, indica que un techo verde con escasa cobertura vegetal puede aumentar la temperatura de sustrato y la del ambiente cuando el sustrato está seco y la velocidad del viento es baja. Sin embargo, un techo verde bien cubierto puede detener más del 60% de la ganancia de calor de un edificio y reduce el riesgo de deslumbramiento en los edificios circundantes (Hien et al., 2007). Estas modificaciones inciden sobre la temperatura de la superficie del sustrato de techo verde que afecta el uso de energía en los edificios, depende principalmente de la cantidad de radiación total absorbida por la superficie, la cual es influenciada por el contenido de humedad del sustrato y las propiedades térmicas del mismo. Los techos verdes tienen un rendimiento térmico diferente con una cobertura vegetal diferente, lo que afecta la demanda de energía en los edificios. En general, la temperatura de la superficie del sustrato del techo verde disminuye con un aumento en la cobertura vegetal predominantemente debido a la disminución en la cantidad de radiación solar recibida en la superficie del sustrato, así como el aumento en la cantidad de humedad cerca de la superficie y la cantidad de superficie evaporante del sustrato (Yaghoobian & Srebric, 2015). La evapotranspiración del cultivo en los techos verdes se compone de evaporación y transpiración. El contenido de agua del sustrato se transfiere desde este al aire durante la evaporación. A diferencia de la evaporación, la transpiración tiene lugar en las hojas y en el cuerpo de las plantas, como la liberación del vapor de agua de los estomas en las hojas y la piel de los poros del dosel (Raji et al., 2015). Las hojas eliminan el calor del medio mediante la pérdida de calor por radiación en longitudes de onda larga. El calor sensible y latente también se disipa a través de la convección y la evaporación, respectivamente (Wootton-Beard et al., 2016).

La vegetación de los techos verdes, durante el desarrollo del proceso de la fotosíntesis, captura carbono atmosférico (CO₂), lo convierte en carbohidratos y lo almacena en las plantas como biomasa. El almacenamiento de carbono y el secuestro por las plantas ha sido explorado como una estrategia para mitigar el calentamiento global (Leung et al., 2011). La capacidad de almacenamiento y el secuestro de carbono por parte de la vegetación, no solo determina las emisiones de carbono en el exterior, sino que también afectan la concentración de la contaminación en interiores (Benson et al., 1972). El almacenamiento total de carbono y el secuestro bruto por plantas se han estudiado en diferentes ciudades del mundo (Nowak & Crane, 2002; Yang et al., 2005; Ren et al.,

2011; Cox, 2012; Wang & Lin, 2012). A corto plazo, las especies de rápido crecimiento acumulan más carbono que las especies de crecimiento más lento. Sin embargo, a largo plazo, las especies de crecimiento más lento pueden acumular mayor cantidad (Cox, 2002; Redondo-Brenes, 2007). Las especies de hoja perenne pueden realizar la fotosíntesis de manera continua durante todo el año, lo que permite la captación de más carbono que las especies de hoja caduca que tiene un receso vegetativo invernal sin follaje (Gratani & Varone, 2006; Wang et al., 2014). Los servicios ecosistémicos que prestan los techos verdes a través de la fotosíntesis (fijación de carbono, liberación de oxígeno y agua al ambiente), o el enfriamiento evaporativo dependen de la conductancia estomática para que las plantas puedan realizar intercambios a través de difusión, con el ambiente circundante. Blanusa et al. (2013) encontraron que la conductancia estomática de la hoja fue significativamente menor en las plantas con riego mínimo en comparación con los tratamientos "bien regados". Esto fue acompañado por la disminución en la evaporación instantánea, encontrando que, reducir la irrigación, disminuyó la conductancia estomática en un 40% para la especie *Stachys* sp. y en un 50% para *Sedum* sp.

Además de la vegetación, el contenido de agua del sustrato determina en gran medida el rendimiento térmico del techo verde (Castleton et al., 2010; Farrell et al., 2013; Vestrella et al., 2015; Azeñas et al., 2018). Algunos autores mostraron que un bajo contenido de agua en el sustrato podría mejorar el ahorro de energía con una menor demanda de calefacción durante el invierno y de refrigeración en el verano (Castleton et al., 2010; Zinzi & Agnoli, 2012). Estos resultados sugieren la relevancia de las estrategias de riego en los techos verdes para maximizar los beneficios del aislamiento térmico cuando la disponibilidad de agua es limitada (Farrell et al., 2013; MacIvor et al., 2013; Li & Yeung, 2014; Van Mechelen et al., 2015).

La precipitación suele ser impredecible y esporádica en regiones áridas y semiáridas, y se pierde rápidamente debido a la evaporación y la escorrentía. Por lo tanto, la contribución del agua de lluvia al rendimiento del cultivo es baja (Oweis y Hachum, 2006). El riego conducido es fundamental en estas zonas y se utiliza para complementar la lluvia con el fin de lograr el establecimiento de los cultivos y el máximo rendimiento (Fereres & Soriano, 2007; Oweis & Hachum, 2006; Zhang & Oweis, 1999). Debido a la escasez de agua, esta irrigación complementaria a menudo se extrae de los acuíferos subterráneos, lo que lleva a una disminución del nivel freático e impacta en el problema de la escasez de agua (Zhang y Oweis, 1999; Morábito et al., 2010). Una mejor estrategia sería maximizar la producción por unidad de agua consumida (la productividad del agua) en lugar de maximizar la producción por unidad de área (Oweis y Hachum, 2006; Fereres y Soriano, 2007). Esta estrategia de "riego deficitario" se usa cada vez más en la agricultura y la horticultura, especialmente en las regiones donde el agua es escasa. En la estrategia de riego deficitario, se aplica una lámina de agua en cantidades por debajo del requisito total de evapotranspiración del cultivo, lo que aumenta el potencial hídrico y disminuye ligeramente el rendimiento del cultivo (Pereira et al., 2002; Oweis & Hachum, 2006; Fereres & Soriano, 2007). Se ha demostrado que se puede alcanzar el máximo potencial de agua cuando solo se aplican de 1/3 a 2/3 de los requisitos de riego al cultivo (Pereira et al., 2002; Martínez, 2011). Esta estrategia de optimización también podría ser útil en el contexto de un techo verde, ya que al limitar el riego a los períodos de crecimiento sensibles a la sequía (es decir, la fase de establecimiento y las estaciones de crecimiento) y al solo agregar una fracción de la tasa de evapotranspiración del techo

verde, la productividad del agua puede ser maximizada. No se estabiliza el rendimiento mediante el uso de la estrategia de riego deficitario, sino más bien el crecimiento y la supervivencia de las plantas, lo que garantiza la contribución a los servicios ecosistémicos urbanos. Cameron y colaboradores (2006) aplicaron la estrategia de riego deficitario a algunas plantas leñosas ornamentales y concluyeron que el déficit hídrico moderado (es decir, el 50% de la evapotranspiración del cultivo) tiene el potencial de mejorar la calidad del cultivo. También el estrés hídrico moderado durante las etapas tempranas de la vida de algunas especies ornamentales (por ejemplo, *Silene vulgaris* y *Rosmarinus officinalis*) dio como resultado una mejor regulación estomática y mayores tasas de supervivencia de la especie durante los períodos secos en etapas ontogénicas posteriores (Sánchez-Blanco, et al., 2004). Los déficits de agua más graves (es decir, 25% o menos de evapotranspiración del cultivo) dieron como resultado una calidad reducida de las plantas ornamentales (Cameron et al., 2006). Por lo tanto, un régimen de riego deficitario del 50% de la demanda evapotranspiratoria del techo verde sería suficiente para garantizar la supervivencia de la vegetación del mismo y, al mismo tiempo, limitar la cantidad de agua utilizada para riego contribuyendo al uso racional de un recurso escaso en regiones áridas y semiáridas (Timmerman et al., 2005).

Comportamiento térmico y energético de cubiertas vegetadas

Numerosos artículos se han enfocado en la cuantificación de la incidencia en términos de temperatura del verde urbano (Wang et al., 2014). La literatura que describía los efectos de la infraestructura verde urbana en el clima interior y el uso de energía se centró principalmente en dos categorías de infraestructura verde urbana, la vegetación adyacente (Heisler, 1986; Shashua-Bar & Hoffman, 2004; Akbari et al., 2007; Escobedo et al. 2018) y el enverdecimiento de techos y paredes (Eumorfopoulou & Kontoleon, 2009; Zinzi & Agnoli, 2012). La vegetación en techos afecta el ambiente térmico interior mediante el control solar y la evaporación, lo cual ha sido ampliamente estudiado mediante enfoques empíricos. Se han presentado resultados que indican que los techos vegetados redujeron la temperatura ambiente en 1.0 a 4.3 °C en diferentes países (Niachou et al., 2001; Susca et al., 2011), mientras que la reducción de la temperatura de la superficie varió en 1.9 a 60.0 °C (Onmura et al., 2001; Wong et al., 2003; Eumorfopoulou & Kontoleon, 2009; Parizotto & Lamberts, 2011; Blanusa et al., 2013; Lin et al., 2013). Además, se observa que el flujo de calor a través del techo y la pared, responsable del aumento de calor en verano y la pérdida de calor en invierno, disminuye debido a la vegetación en varios estudios de casos (Onmura et al., 2001; Eumorfopoulou & Kontoleon, 2009; Parizotto & Lamberts, 2011). Debido a estos efectos, se encontró que la temperatura del aire interior se redujo en 0.5 a 5.0 °C (Niachou et al., 2001; Eumorfopoulou & Kontoleon, 2009; Rashid & Ahmed, 2009). El ahorro de energía que se puede lograr con techos y paredes vegetados también es significativo. La instalación de un techo y una pared verde puede resultar en una reducción de energía de aproximadamente 2 a 48%, como lo demuestra Niachou et al. (2001). El ahorro energético de las paredes y techos verdes urbanos depende de las propiedades de las fachadas y del sustrato, la ubicación, el clima, las especies y la cantidad de plantas por unidad de superficie (Wong et al., 2003; Blanusa et al., 2013). Las plantas contribuyen a la reducción de energía en interiores (asociada con la reducción de la temperatura), en particular para edificios sin aislamiento (Niachou et al., 2001).

Beneficios térmicos de los techos verdes

En el sector de la construcción, los techos verdes son atractivos debido a su rol en la mitigación de la demanda de energía, al mejorar el rendimiento térmico de los edificios (Castleton et al., 2010; Vijayaraghavan, 2012). Una investigación realizada en el sur de Italia revela que los techos verdes (sin ningún material de aislamiento) son más fríos en aproximadamente 12 °C en comparación con los techos convencionales, de acuerdo con las mediciones de temperaturas superficiales en verano. Incluso en la temporada de invierno, la diferencia de temperatura entre los techos convencionales y los verdes oscila casi los 4 °C. Desde este punto de vista, los edificios que presentan techos verdes consumen menos energía en comparación con los techos convencionales (Bevilacqua et al., 2016). Los beneficios multifuncionales en términos de mejora del rendimiento térmico en edificios se pueden ilustrar como aislamiento térmico, evapotranspiración y sombreado (Saadatian et al., 2013; Raji et al., 2015; Vijayaraghavan, 2016).

Comportamiento térmico y energético derivado de la Evapotranspiración

El comportamiento térmico de los edificios depende de los detalles estructurales de la envolvente del edificio. Para mejorar el rendimiento térmico es necesario también, tener en cuenta las condiciones climáticas del sitio geográfico donde se emplaza. El principal desafío es propiciar la regulación térmica de la envolvente del edificio. Por estas razones, numerosos estudios se centran en las condiciones interiores óptimas para mantener una temperatura y humedad relativa ideal y lograr un menor consumo de energía. Los techos verdes pueden mitigar el consumo de energía y mejorar la calidad del aire por el efecto de la evapotranspiración (Qiu et al., 2013). La humedad juega un papel clave para mantener la regulación térmica tanto en ambientes húmedos como secos. Cuando la cantidad de agua en el aire aumenta por efecto de la transpiración de la vegetación junto a la evaporación del contenido de humedad del sustrato, el calor se disipa por evapotranspiración. El incremento de humedad en el aire puede tener efectos tanto positivos como negativos en las condiciones interiores con respecto a las características climáticas (Wang et al., 2014). Por lo tanto, es de vital importancia proporcionar una adecuada evaporación de agua desde el dosel y el sustrato en los techos verdes (Xiao et al., 2014). De acuerdo con los resultados del modelo matemático realizado para las condiciones climáticas de verano en China, el 58% del calor de un techo verde se pierde por evapotranspiración, mientras que aproximadamente él se pierde 31% por intercambio a través de radiación de onda larga y el 1.2% es almacenado o transferido al edificio a través de la cubierta (Castleton et al., 2010). La forma de disipación del calor se puede dividir en tres partes principales, la evapotranspiración, la pérdida de calor por radiación de onda larga y la fotosíntesis. El calor de evapotranspiración representa el 51,5%, mientras que la pérdida de calor por radiación de onda larga representa el 40,1% y la fotosíntesis alrededor del 8,4%, respectivamente. De acuerdo a los resultados, el calor transferido al edificio es inferior al 0,5% en la mayoría de los casos estudiados. La temperatura del techo en el lado exterior se ve notablemente afectada por la radiación solar, mientras que el efecto del contenido de agua en el aire es casi insignificante en comparación con la radiación solar (Xiao et al., 2014).

Con el fin de conocer el papel de la evapotranspiración en la reducción de la penetración de calor desde los techos verdes a los edificios, se realizaron varios intentos

experimentales para evaluar la gama de flujos de calor en techos verdes en comparación con los techos convencionales. Por ejemplo, se ha investigado experimentalmente un hospital ubicado en el noreste de Italia, en el que los techos verdes húmedos y secos se evalúan en términos de flujo de calor y los resultados se comparan con el techo tradicional. La pérdida de calor del techo verde mojado se encuentra que es dos veces mayor que la del techo verde seco debido a la evapotranspiración. En comparación con el techo tradicional, el flujo de calor en el edificio a través del techo verde seco es aproximadamente un 60% menos, lo que es notable (Molineux et al., 2009; Castleton et al., 2010). Como consecuencia de la evapotranspiración, disminuye la penetración de calor en el edificio en verano, por lo tanto, la demanda de enfriamiento de los edificios se reduce considerablemente mediante esta estrategia de enfriamiento pasivo (Saadatian et al., 2013). En resumen, la evapotranspiración y su papel clave en la minimización de la penetración de la radiación solar en el edificio son las principales razones de los efectos de enfriamiento de los techos verdes. Se entiende que el cambio en la temperatura entre las superficies exterior e interior del techo verde es considerable (Xiao et al., 2014). Si los techos verdes tuvieran una difusión masiva, como se refiere en la literatura, la temperatura promedio del área relacionada puede reducirse en un rango de 0,3 a 3,0 °C (Vijayaraghavan, 2016; Wootton-Beard et al., 2016).

Aislamiento térmico

Numerosos estudios, afirman que el espesor de los medios de crecimiento -sustratos- afecta notablemente la característica de aislamiento térmico de los techos verdes. El estudio realizado por Permpituck y Namprakai (2012) investiga la característica de aislamiento térmico de dos techos verdes diferentes (con espesores de sustratos de 10 y 20 cm) en comparación con un techo convencional. Con respecto a los resultados, la reducción en la transferencia de calor y el consumo de energía es notable. Se encuentra que la transferencia de calor disminuye en un 59 y un 96%, mientras que el consumo de energía en un 31 y 37%, respectivamente, para techos verdes de 10 y 20 cm de espesor en comparación con el caso de techos desnudos. Liu y Minor (2005) realizaron un intento similar y evalúan la tasa de transferencia de calor entre techos verdes de 7,5 cm y 10 cm de espesor en comparación con un techo desnudo de referencia. Se concluye que el rendimiento térmico de los techos verdes depende del espesor de la superficie de la vegetación. Por otro lado, se ha encontrado que los impactos del espesor del sustrato en el rendimiento del techo verde se pueden analizar en términos de aislamiento térmico y ahorro de energía para las estaciones de refrigeración y calefacción (Wong et al., 2003; Sailor et al., 2012). La disminución de la humedad del sustrato conduce a reducir el flujo de calor a través de los techos. Se observa que la resistencia térmica del sustrato aumenta en 0.4 m². K/W al usar 100 mm de espesor en medios de cultivo secos (Wong et al. en 2003). Además, debido a la capa de aislamiento adicional del sustrato, el calor tiende a almacenarse dentro del edificio (Zinzi & Agnoli, 2012).

Con respecto al contenido de agua del sustrato, se observa que tiene diferentes impactos en el rendimiento térmico de los techos verdes dependiendo de las condiciones climáticas. Como ejemplo, los medios de crecimiento que permiten mayores contenidos de agua tienen una ventaja debido a la posibilidad que le otorgan al cultivo de realizar la evapotranspiración con mayor eficiencia, lo cual mejora la disipación del calor, por lo tanto, se minimiza la demanda de enfriamiento durante el período de verano (Raji et al.,

2015; Castleton et al., 2010). Esta hipótesis había sido estudiada por Lazzarin et al. (2005), demostrando que los techos verdes húmedos proporcionan un 40% mejor rendimiento en comparación con los techos aislados convencionales. De acuerdo con estos resultados, se recomienda que la forma efectiva sea usar un sustrato húmedo en verano y suelo seco en invierno. Esto se debe a que la tierra seca se utiliza para aumentar el almacenamiento de calor y la función de aislamiento térmico en invierno mientras que el sustrato húmedo se implementa para mejorar los efectos de convección y conducción en el período estival (Xiao et al., 2014).

Flujo de calor, efecto de sombra y ahorro de energía

La implementación de cubiertas vegetadas sobre los edificios permite aumentar el confort térmico debido a los efectos de la sombra sobre la superficie del techo como resolución importante para mantener la termorregulación en edificios. Los techos verdes al incorporar biomasa y vegetación al ambiente construido, permiten mitigar los efectos de la isla de calor urbano con el aporte adicional de beneficios térmicos a los edificios (Saadatian et al., 2013).

La relación de cobertura y el espesor de la hoja permiten regular el confort térmico interior en el período de enfriamiento (Raji et al., 2015). Dependiendo de los resultados, la temperatura máxima del suelo desnudo está determinada por 42 °C y la superficie cubierta con vegetación no supera los 36 °C. Además de esto, el cambio en la temperatura de la superficie depende de las características de la vegetación y la variación diaria máxima es de aproximadamente 26 °C (Saadatian et al., 2013). En otro estudio, el techo verde extensivo con menos espesor de sustrato y sin sistema de riego se implementa en edificios aislados. Como resultado, la variación de la temperatura en relación con el techo de grava es mayor en comparación con el techo verde en los días de verano, siendo el techo verde aproximadamente 20 °C más frío que el techo de grava (Getter et al., 2011).

Teemusk & Mander (2009) llevaron a cabo en Estonia un diseño experimental en empleando 100 mm de grosor de medio de cultivo para una cubierta vegetada, demostrando que la variación de la temperatura en el período de enfriamiento se reduce al instalar un jardín en el techo. Además, el aislamiento térmico se vuelve efectivo en invierno debido a la presencia de una capa de sustrato.

Otro estudio realizado por Wong et al. (2003) se enfoca en una resistencia térmica de techo verde con diferentes tipos de plantas. Dicha resistencia aumenta con el aislamiento y el valor de U (transmitancia térmica), que depende de las características de la vegetación, como el césped, los arbustos y los árboles. Estudios previos demostraron que el flujo de calor disminuye con la instalación del techo verde. Estos estudios indican que el flujo de calor puede disminuir dependiendo de la vegetación y de la capa de sustrato. Además de estos estudios, el efecto de diferentes sistemas de drenaje en techos verdes fue investigado experimentalmente por Coma et al. (2016). También el techo verde con dos sistemas de drenaje distintos se comparó con el techo de referencia aislado. El consumo de energía entre el caso de referencia y el caso con techo verde se comparan entre sí en la temporada de calefacción y en la de refrigeración. Los resultados indican que el techo verde extensivo consume hasta el 17% menos de energía que el techo de referencia durante el verano. El mismo techo de referencia, con aislamiento, consume también menos energía, hasta el 11% menos que el de referencia sin aislar, lo cual significa mayor

consumo de energía que el techo verde extensivo. Por el contrario, otro estudio experimental realizado por Silva et al. (2016) destaca el rendimiento de tres tipos diferentes de techos verdes -extensivo, intensivo y semi-intensivo- y compara el techo tradicional con diferentes propiedades de aislamiento con el techo verde. Las necesidades de energía en invierno fueron aproximadamente iguales para ambos tipos de techos verdes, pero para el verano, las demandas de energía fueron notables, y del orden de 23.6 12.3, y 8.2 kWh /m²/año para los techos verdes extensivos, semi-intensivos e intensivos, respectivamente. Con respecto al grosor de la capa de aislamiento, las necesidades de energía para calefacción y refrigeración disminuyen con el aumento del ancho de aislamiento para los tipos de techo verde y techo tradicional. En comparación con un techo negro, el techo verde semi-intensivo e intensivo tienen mayor ahorro de energía, pero el extensivo consume más energía debido a la mayor absorción solar y menor evapotranspiración que el resto -semi-intensivo e intensivo- en verano. A su vez, al compararlo con un techo blanco, el techo verde no es eficaz para reducir el consumo de energía en comparación con el techo blanco debido a que tiene propiedades altamente reflectantes (Silva et al., 2016).

Por otro lado, el estudio realizado por Arkar et al. (2015) muestra que la pérdida de calor de los techos verdes es más baja que los techos convencionales en el período de calentamiento, pero sin nieve. Los autores diseñaron medios de cultivo de lana mineral livianos utilizados en techos verdes en condiciones invernales y encontraron que las tasas de pérdida de calor oscilan en el rango de 8% a 14% en comparación con el techo de referencia. En un estudio similar, Squier & Davidson (2016), con medios de crecimiento que contienen de 4-8% de materia orgánica en el sustrato, encontraron que, si aumentan el espesor del medio de crecimiento, la resistencia térmica también aumenta y el valor es de casi 3,1 m².K/W. Tanto el techo verde como el techo tradicional después de la capa de nieve acumulada muestran una tasa de flujo de calor similar.

En general se ha observado que el techo verde es altamente efectivo para reducir el consumo de energía y mantener el confort térmico del ambiente interior, como también es una herramienta de mitigación de la isla de calor urbano "ICU" (UHI, por su sigla en inglés). Las razones de estos beneficios son el efecto de sombra de la vegetación, la evapotranspiración que incluye no solo las plantas sino también los medios de crecimiento y, finalmente, el efecto del aislamiento térmico, especialmente en invierno. Además, el consumo de energía disminuye con el aumento del espesor de los medios de crecimiento y la capa de aislamiento. Incluso, los diferentes tipos de techos verdes muestran resultados notables, particularmente en la temporada de enfriamiento (Besir & Cuce, 2018).

Ahorro energético en edificios

La envolvente del edificio, separa el interior de un edificio del exterior. El rendimiento energético de un edificio en términos de envolvente puede describirse como una minimización del requerimiento de energía para calentar y enfriar debido a la materialidad de la envolvente. Los componentes de la misma consisten en paredes externas, pisos, techos, ventanas y puertas. La pérdida de energía como un tema crucial para el rendimiento energético depende de la edad y del tipo de construcción, del clima donde se implanta la edificación, de los materiales de construcción de la envolvente, del

comportamiento del habitante/usuario y de la ubicación geográfica (International Energy Agency, 2013).

El efecto de la construcción de la envolvente sobre el consumo de energía es innegable. La cantidad de energía utilizada en el sector edilicio representa un tercio del consumo mundial de energía para calefacción y refrigeración de espacios. Además, el consumo de energía en climas fríos tiene una tendencia creciente que se acerca al 50% (International Energy Agency, 2013). En los edificios, la pérdida de calor tiene lugar en paredes, techos y pisos debido a que son las áreas más expuestas y externas de los mismos. Al proporcionar aislamiento contra la pérdida de calor, ya sea en regiones frías o en climas cálidos, el consumo de energía puede disminuir notablemente, en función de la elección de los diferentes materiales de la envolvente (Riffat & Cuce, 2012; Cuce et al., 2014; Cuce, 2015; Cuce & Riffat, 2015; Cuce E. & Cuce P. M., 2016; Cuce et al., 2016; Cuce, 2017).

La eficiencia energética del edificio puede mejorarse logrando una reducción considerable en las temperaturas mediatas del entorno exterior. A este respecto, las modificaciones de bajo costo, energéticamente eficientes y ecológicas en la envolvente del edificio son altamente necesarias para minimizar dichos efectos. Existen diferencias significativas en los valores de temperatura ambiente (de al menos 2 a 4 °C) entre las regiones urbanas y rurales (International Energy Agency, 2013).

Entre las soluciones potenciales para minimizar la demanda de calefacción de los edificios a través de las modernizaciones rentables y ecológicas en la envolvente del edificio, los sistemas de vegetación se destacan como una de las medidas más adecuadas. El ahorro potencial de energía en edificios a través de sistemas de vegetación es estudiado tanto experimentalmente como numéricamente por numerosos investigadores, según se encuentra en la literatura (Savio et al, 2006; Figueroa, 2009; Smith and Roeber, 2011; Qiu et al, 2013; Santamouris, 2014). De acuerdo con los resultados, las reducciones de la pérdida de calor de los techos en verano e invierno son aproximadamente de 70 a 90% y de 10 a 30%, respectivamente, mediante el uso de techos verdes. Liu y Baskaran (2014) han encontrado que los techos verdes pueden reducir la ganancia y la pérdida de calor en un 95% en verano y en un 26% en invierno, constatando que las superficies verdes absorben alrededor del 70% de la radiación solar entrante.

Análisis de escenarios con cubiertas vegetadas mediante simulación numérica

Los estudios que se centran en el impacto de los techos con vegetación en el consumo de energía de los edificios han demostrado una gran variabilidad con respecto a la reducción de la energía de calefacción y refrigeración (Vera et al., 2017). Esta variabilidad entre los estudios se debe a las diferencias en distintos aspectos: (1) zonas de ubicación / clima; (2) tipos de construcción; (3) enfoques para el análisis de estos ahorros de energía, ya que muchos enfoques numéricos y de campo utilizan diferentes ganancias de calor interno o sistemas HVAC (sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado) ideales; y (4) modelos numéricos de transferencia de calor y masa de techos verdes. Por ejemplo, Ascione et al. (2013) calculó ahorros de energía de refrigeración entre 1% y 11% en una oficina de un piso con techo con vegetación en diferentes climas europeos cálidos y ahorros de energía de hasta el 7% en climas europeos fríos. Otro estudio en Atenas (Grecia) con un techo verde sobre una losa de hormigón del edificio de un supermercado

encontró reducciones de la carga de refrigeración y calefacción de hasta el 19% y el 11%, respectivamente (Foustalieraki et al., 2017). En contraste, un estudio en Pennsylvania (EE. UU.) no encontró ahorros de energía anuales estadísticamente significativos debido a los techos con vegetación en edificios de mock-up (escala más pequeña) (DeNardo et al., 2003).

Los modelos de transferencia de calor y masa precisos y bien validados son esenciales para evaluar el rendimiento energético de los edificios. Estos modelos deben estar acoplados a herramientas de simulación de energía del edificio o modelos climáticos para una evaluación adecuada de estas tecnologías en las primeras etapas de la construcción o para el modelado de meso escala. Entre los trabajos analizados, los parámetros de diseño del dosel o cobertura vegetal más comunes analizados fueron el índice de área foliar (LAI), la resistencia estomática (inversa de la conductancia estomática), la altura de las plantas, la reflectividad de la hoja y la emisividad de la hoja. Las propiedades térmicas del sustrato más comunes analizadas fueron la conductividad térmica, la capacidad térmica, la densidad y el espesor. Wong et al. (2003) mostraron que las variaciones en el tipo de vegetación, el contenido volumétrico de agua y el grosor del sustrato causaron ahorros de energía que oscilaron entre el 1% y el 15% en un edificio comercial de cinco pisos en Singapur. Del mismo modo, los estudios en diferentes climas demostraron que los parámetros más importantes de la planta y el sustrato, respectivamente, que influyen en el rendimiento térmico del techo verde, son el índice de área foliar (LAI, por su sigla en inglés) (Theodosiou, 2003; Sailor & Hagos, 2011; Vera et al., 2015; Vera et al., 2017) y el espesor del sustrato (Sailor & Hagos, 2011; Vera et al., 2015; Reyes et al., 2016; Vera et al., 2017). Se confirma a través de simulaciones, que el aislamiento térmico también juega un papel importante en el rendimiento de los techos verdes. Los estudios numéricos y de campo mostraron un menor ahorro de energía en calefacción y refrigeración de los techos verdes aislados (2–10%) que de los techos verdes sin aislamiento (hasta el 48%) porque el aislamiento desacopla las capacidades de enfriamiento de los techos con vegetación (Niachou et al., 2001; Theodosiou, 2003; Sailor et al., 2011; Jaffal et al., 2012; Zhao et al., 2014; Jim et al., 2014; Silva et al., 2016; Vera et al., 2017).

Es importante tener en cuenta que los estudios numéricos se basaron en diferentes modelos de transferencia de masa y calor de techos verdes que han evolucionado en los últimos 35 años. Revisiones anteriores de la literatura internacional sobre techos verdes se centraron en los esfuerzos de investigación en un país particular (Xiao et al., 2014) o zona climática (Hashemi et al., 2015), los beneficios de techos/paredes verdes (Saadatian et al., 2013; Berardi et al., 2014; Raji et al., 2015), consideraciones energéticas (Saadatian et al., 2013; Raji et al., 2015), beneficios asociados a los sistemas fotovoltaicos (Lamnatou & Chemisana; 2015), riego (Freitas et al., 2016), efectos hidrológicos (Herrera et al., 2017; Herrera et al., 2018) y calidad del agua (Hashemi et al., 2015). Cuatro estudios que desarrollaron modelos con techos con vegetación incluyeron una revisión parcial de los modelos anteriores (Tabares-Velasco & Srebric, 2012; Djedjig et al., 2012; Chen et al., 2015; Freitas et al., 2016). Por ejemplo, Tabares-Velasco & Srebric (2012) revisaron siete modelos que comparaban balances de calor/masa, ecuaciones de evapotranspiración y variables consideradas para la validación de los modelos. Chen et al. (2015) revisó seis modelos considerando las variables utilizadas para la validación del modelo, las propiedades térmicas del sustrato y las condiciones de contorno consideradas en el balance energético. Freitas et al. (2016) consideró 17 estudios y se centró en los

impactos del riego en los techos verdes. Finalmente, Djedjig et al. (2012) consideró cinco modelos, pero solo mencionó brevemente los supuestos implementados en los estudios y proporcionó una breve descripción de cada uno de los modelos. Como puede verse, las revisiones anteriores de los modelos numéricos de transferencia de calor y masa están muy limitadas no solo en el número de modelos numéricos evaluados sino también en el análisis crítico de los modelos revisados. Además, solo unos pocos modelos numéricos de techo verde con transferencia de masa y transferencia de calor se han implementado en herramientas de simulación de consumos energéticos a nivel edilicio real. Además, escasos estudios han comparado modelos de techos verdes anteriores con respecto a cada componente y precisión. Como consecuencia, existe la necesidad de evaluar los diferentes modelos numéricos de techos verdes de transferencia de masa y transferencia de calor para obtener una mejor comprensión de sus similitudes y diferencias, así como identificar modelos numéricos más completos que puedan implementarse o acoplarse a la energía de los edificios, a modelos de simulación o a modelos ambientales urbanos (Vera et al., 2018).

Modelos para techos verdes

La mayoría de los modelos de simulación de techos verdes se desarrollaron durante el período 2010-2018 (más del 60% hasta mayo de 2018), destacando el continuo y creciente interés en esta tecnología y la búsqueda de modelos numéricos específicos que mejoren la predicción del rendimiento higrotérmico de esta tecnología. Considerando a la misma como una tecnología de construcción dinámica. Algunos de estos modelos se han aplicado en varios estudios para evaluar el impacto de los techos con vegetación en el rendimiento energético de los edificios y en estudios paramétricos que analizan los efectos específicos de ciertos parámetros de los mismos (Vera et al., 2018). Todos los modelos requieren datos meteorológicos de las condiciones del entorno (exterior). Además, la mayoría de los modelos se han desarrollado y validado con datos de techos verdes extensivos. Aunque la mayoría de los modelos revisados se centran en el análisis de la energía de los edificios, algunos de los modelos se implementan en estudios a escala urbana (Gaffin, 2005; Alexandri & Jones, 2008; Wang et al., 2013; de Munck et al., 2013). Por ejemplo, el modelo desarrollado por Wang et al. (2013) se ha combinado con un modelo de dosel urbano combinado con el modelo Weather Research and Forecasting (WRF) (Smith & Roebber, 2011; Baik et al., 2012; Dan et al., 2014; Sharma et al., 2016), y el modelo de techo verde de Sailor (2008) se ha utilizado para el análisis de microclima (Virk et al., 2015). Estos modelos también se han utilizado para el análisis vegetación urbana (Wang et al., 2016).

Los modelos mencionados se basan en el balance de energía y de masa; en la evapotranspiración de los cultivos; en la inercia térmica; en la resistencia estomática, en el efecto de sombreado de la vegetación; en el rango de contenido de agua volumétrico del sustrato y en sus propiedades térmicas. La validación de estos modelos se ha realizado de forma cuantitativa incluyendo variables como el error cuadrático medio (RMSE) o el error de sesgo medio (MBE) (Vera et al., 2018). Sin embargo, los esfuerzos de validación de techos verdes varían y no siguen un marco común de validación y verificación. Las diferencias entre los esfuerzos de validación incluyen: (i) metodología (por ejemplo, validación con techos reales, réplicas constructivas o resultados de laboratorio), (ii) condiciones de entorno (por ejemplo, temperatura del aire interior, temperatura de la

superficie del techo y temperatura del fondo del sustrato), y (iii) estadísticas reportadas. Según Vera et al. (2018) de 23 modelos analizados, veinte fueron validados originalmente con datos de ensayos experimentales. El desarrollo y la validación de estos modelos se han realizado en varios países del mundo y para diferentes climas según la clasificación de Köppen-Geiger.

Uso de simuladores para escenarios a escala edilicia con techos verdes

Los estudios de techos verdes con ensayos experimentales se han limitado principalmente a los efectos de enfriamiento y a la cuantificación y el análisis de la temperatura a nivel superficial de las cubiertas. Entonces surgió la necesidad de una herramienta de diseño más completa. Arquitectos, ingenieros civiles, planificadores urbanos y demás interesados del sector de la construcción requieren una herramienta de diseño para poder evaluar los beneficios y el comportamiento térmico y energético derivado de la aplicación de los techos verdes en sus propios proyectos. Para abordar este problema, Sailor (2008) realizó un modelo matemático para predecir los beneficios de la estrategia de techos verdes con el software EnergyPlus. El módulo de techo verde de Sailor ayuda a los profesionales del ámbito de la construcción a explorar las opciones de diseño con techos verdes. El modelo incluye las propiedades térmicas, las características de la vegetación, es decir, el índice de área foliar¹ (IAF, en inglés: Leaf Area Index: LAI), la altura y el tipo de plantas, los medios de crecimiento y la profundidad del medio de cultivo como los principales factores que se pueden usar en el modelo matemático para predecir el comportamiento térmico y energético del techo verde.

Una de las ventajas energéticas más importante de los techos verdes es su contribución al aislamiento de los edificios, que por lo general se traduce en ahorros de energía tanto para calefacción como para refrigeración. Además de su impacto en el consumo de energía en los edificios, los techos verdes contribuyen a la mitigación de la isla de calor. Aumentan en la ciudad, la superficie total permeable al agua, ayudando a retener el agua en el suelo y permitiendo que grandes cantidades estén disponibles para la evapotranspiración. Al mismo tiempo, los techos verdes presentan valores de albedo mucho más altos que las superficies oscuras de los techos urbanos, lo que refleja mayor proporción de la radiación solar incidente y evita que se transforme en calor (Getter et al., 2006).

El rendimiento de los techos verdes es una función directa de numerosos parámetros climáticos, térmicos e hidrológicos. Para evaluar el impacto relativo de los principales parámetros de diseño, se realizaron análisis de sensibilidad para calcular la influencia relativa del clima, así como del índice del área foliar (LAI) y la tasa de riego. Lo cual resulta en que a medida que el LAI es mayor, más densa es la vegetación utilizada en el techo verde. Un valor típico de LAI para techos verdes es LAI=1. El análisis detallado realizado en por Hodo-Abalo et al. (2012) sobre la tasa de evapotranspiración de un techo verde, concluyó que el LAI es el parámetro clave que define las pérdidas por evaporación.

Kolokotsa et al. (2013) también realizaron un análisis de sensibilidad para los valores de LAI de 0.05, 0.5, 1, 2 y 3 para cubrir todo el rango de posible vegetación. El calor sensible diario máximo liberado para un techo convencional en Creta es de 157 W/m², mientras

¹ El LAI representa la cantidad material de hoja en un ecosistema y se define geoméricamente como el área total unilateral de tejido fotosintético por unidad de área de superficie del suelo.

que los valores correspondientes para los valores de LAI 0.5, 1, 2 y 3 son 104 W/m^2 , 70 W/m^2 , 33 W/m^2 y 21 W/m^2 respectivamente. Los valores disminuyen en un 20-25% en el caso de un techo verde irrigado. El aumento de la tasa de riego de cero a 0.1 reduce la carga sensible en 20 –25%, mientras que el aumento de la tasa de riego de 0.1 a 0.3 tiene un efecto casi insignificante. En cuanto a las temperaturas ambientales interiores en Creta, los techos verdes con LAI = 3 presentan las temperaturas interiores máximas en verano 3 veces más bajas que los techos con LAI=1. El flujo de calor sensible liberado por el mismo techo verde (es decir, el tipo de techo verde extensivo con LAI=1 y sin tasa de riego) se calcula bajo diferentes condiciones climáticas, el cual varía considerablemente entre 50 y 70 W/m^2 , pero siempre permanece más bajo que con las construcciones convencionales.

En Londres, para valores de LAI cercanos a cero (0.05), el calor sensible diario máximo liberado es cercano a 87 W/m^2 , para techos verdes irrigados y no regados. Los valores correspondientes para LAI iguales a 0.5, 1, 2 y 3 son 56 W/m^2 , 37 W/m^2 , 17 W/m^2 y 10 W/m^2 . Se obtienen valores casi similares para cubiertas irrigadas. Paralelamente, la energía sensible liberada durante todo el verano por un techo verde sin riego en Creta es cercana a 176 kWh/m^2 , mientras que se reduce a 124 kWh/m^2 , 88 kWh/m^2 , 73 kWh/m^2 y 8 kWh/m^2 para valores LAI de 0.5, 1, 2 y 3 respectivamente.

Los valores correspondientes para Londres son sustancialmente más bajos y, en particular: 119 kWh/m^2 , 86 kWh/m^2 , 62 kWh/m^2 , 20 kWh/m^2 y 12 kWh/m^2 , para valores LAI de 0.05, 0.5, 1, 2 y 3 respectivamente. La variación del valor integrado de la carga sensible liberada por un techo verde en Creta durante todo el período de verano para varios valores de LAI y tasa de riego indica que cuando la tasa de riego aumenta de cero a 0.1, la energía sensible integrada disminuye a aproximadamente el 14% para un LAI cercano a cero y un 2% para el LAI igual a 3. Los cambios insignificantes se obtienen cuando la tasa de riego aumenta de 0.1 a 0.3. Es evidente que el aumento de LAI aumenta el potencial de mitigación del techo verde. Por lo tanto, los techos verdes intensivos que tienen un LAI considerablemente mayor que 2 pueden contribuir a una reducción de casi el 90% del flujo de calor sensible liberado.

Respecto al porcentaje de horas de sobrecalentamiento, se utilizó para evaluar el rendimiento de diferentes box experimentales, según propone La Roche & Berardi (2014). Para este estudio, utilizaron la reciente teoría de la comodidad adaptativa, las Condiciones Térmicas Ambientales para la Ocupación Humana en edificios de funcionamiento libre, de acuerdo con la Norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013). Los períodos con horas de sobrecalentamiento fueron el 8.3% del tiempo total para los registros de temperatura ambiente exterior, 45.8% en el box experimental de control, 41.7% en el box experimental no aislado, 0% en el techo inteligente y 45.8% en el box experimental aislado. La ventilación forzada desde el exterior funciona de 9 pm a 6 am en todos los box, excepto en el de techo verde con aislamiento variable; 4,2% en el box con techo sin aislamiento, 0% en el techo inteligente y 33,3% en el techo aislado. Estos resultados muestran que cuando el ventilador estaba apagado, el techo verde con aislamiento variable se comportaba como el techo aislado (más cálido), mientras que cuando el ventilador estaba encendido, el techo verde con aislamiento desacoplable se comportaba como el techo verde sin aislamiento (refrigerador). Esto confirmó que encender y apagar el ventilador podría usarse con eficacia tanto en verano como en

invierno. Por lo cual, estos resultados demostraron que una forma eficiente de evitar el aumento de las cargas de calefacción y refrigeración que pueden generar los techos verdes es permitiendo un sistema de aislamiento variable que acopla y desacopla plenamente debajo de un techo verde en función de las fluctuaciones de temperatura. Por lo tanto, se realizaron simulaciones de software para mostrar la validez del enfoque propuesto para diferentes condiciones climáticas. Para este alcance, se utilizó un mismo edificio de oficinas modelado.

El edificio de oficinas rectangular de una planta (aspecto = 1.5), fue modelado con cinco zonas. El área total del piso para cada edificio es 4982 m². El prototipo se construyó como un edificio que cumple con el código, haciendo referencia a la Encuesta de Consumo de Energía de Edificios Comerciales (2003 CBECS), y los Estándares 90.1 y 62.1 (2004) de ASHRAE. El edificio fue modelado con ocupación típica, equipo, y los horarios de termostato como se indica en Torcellini et al., (2008).

Con comparaciones realizadas en tres ciudades americanas (Phoenix, Los Ángeles y Chicago) para evaluar el posible incremento en el ahorro de energía con aislamiento variable respecto de los techos verdes más tradicionales, se encontró que se comportó positivamente en todas las condiciones climáticas con un ahorro de energía anual de 9.13%, 8.92% y 2.11% para Phoenix, Los Ángeles y Chicago, respectivamente. La comparación se realizó utilizando como referencia el conjunto de techo verde L5S6N4 (LAI igual a 5, espesor del suelo igual a 6 pulgadas o 15.24 cm, aislamiento igual a 4 pulgadas o 10.16 cm).

Un enfoque diferente hubiera sido seleccionar para cada clima el ensamblaje que había obtenido el máximo ahorro de energía, y modificar este ensamblaje agregando un "pleno inteligente". Si se implementara este segundo enfoque, se habrían seleccionado los siguientes techos verdes: L1S12N8 para Chicago y L1S6N0 para Los Ángeles y Phoenix. Sin embargo, este segundo enfoque habría eliminado la capacidad de comparar el mismo sistema de techos verdes entre diferentes condiciones climáticas, especialmente considerando que el sistema L1S6N0, óptimo en Los Ángeles y Phoenix, tuvo un impacto negativo (aumento de EUI) en Chicago. La simulación muestra la ventaja de enfriar la masa del techo verde utilizando un aislamiento variable.

Silva et al. (2016) analizaron el rendimiento térmico de una sala de sonido técnico modificada con el programa de simulación energética del edificio EnergyPlus (EnergyPlus, 2013) que integra un modelo de techo verde desarrollado por Sailor (Sailor, 2008). Este modelo de techo verde es un modelo unidimensional que se basa en supuestos energéticos tanto para la capa de follaje como para la superficie del terreno, es decir, intercambios de radiación de longitudes de onda largas y cortas, efectos de la vegetación en el flujo térmico por convección (calor sensible), evapotranspiración (calor latente), almacenamiento de calor y transferencia a través del sustrato (Silva et al., 2016). El modelo técnico geométrico de la sala de sonido se creó en Google SketchUp (Google SketchUp, 2013). El espacio de aire del cielo raso no se incluyó en los modelos, ya que los resultados experimentales no muestran diferencias relevantes entre la temperatura interior y la temperatura dentro del techo suspendido. Todas las demás capas del techo, como la losa de concreto y la capa de grava descritas, se introdujeron en EnergyPlus con las propiedades correspondientes. Se pueden encontrar más detalles sobre estas

simulaciones en (Silva, 2014). Este documento estima el rendimiento energético de diferentes tipos de techos verdes en condiciones climáticas mediterráneas y compara su rendimiento con las soluciones de techos tradicionales. Simulaciones de energía de construcción validadas experimentalmente se llevaron a cabo en una sala de sonido técnico en Lisboa. Primero, se analizó la eficiencia energética de los tres tipos de techos verdes. Las necesidades de energía de calefacción son similares para los techos verdes extensivos, intensivos y semi-intensivos, pero las soluciones semi-intensivas e intensivas muestran menores necesidades de energía de enfriamiento, aproximadamente el 36% y el 17% de los techos verdes extensivos. La eficiencia de las soluciones semi-intensivas e intensivas también es evidente cuando se compara el uso anual de energía de las tres soluciones, ya que los techos verdes extensivos demandan aproximadamente dos veces más energía anual que las soluciones semi-intensivas y tres veces más energía que las intensivas. Posteriormente, se evaluó el rendimiento energético de las soluciones de techo verde y techo tradicional. Se encontró que los techos verdes intensivos y semi-intensivos requieren valores más bajos de uso de energía anual que los techos convencionales (blanco y negro) y también que los techos verdes extensivos. El nivel de aislamiento térmico reduce el ahorro de energía obtenido con las soluciones de techos verdes. Cuando se compara con un techo negro, el techo verde semi-intensivo demostró usar 30 a 60% menos de consumo de energía anual, dependiendo del nivel de aislamiento. El techo verde intensivo mostró un rendimiento aún mejor, requiriendo de 45 a 70% menos de energía en las mismas condiciones. Como se esperaba, los techos blancos son más eficientes que los techos negros. Sin embargo, las soluciones de techo verde semi-intensivas e intensivas son aún más competitivas, lo que lleva a un ahorro de energía del 10 al 45% y del 25 al 60%, respectivamente. Para niveles de aislamiento bajos, típicos en edificios antiguos con capacidad estructural limitada, los techos extensivos con un sustrato técnico (densidad reducida) pueden ser una solución para reducir el uso de energía del edificio, ya que demostraron ahorrar alrededor del 20% del uso de energía en comparación con el techo negro y muestran un rendimiento similar al blanco. Para niveles de aislamiento más altos, esta solución de techo verde no parece tener beneficios con respecto a la reducción del consumo de energía (Silva et al., 2016).

Ouldboukhitine et al. (2014) realizaron simulaciones para evaluar el rendimiento energético de la plataforma estudiada para techos convencionales y ecológicos. Los ensayos experimentales, con los que se validaron las simulaciones, se construyeron en el campus de la Universidad de La Rochelle (Francia), en una plataforma experimental con techos verdes (escala 1:10) con un espesor de losa de hormigón de 4 cm y un techo verde a escala. El objetivo de esta instalación fue recopilar datos experimentales para el comportamiento higrotérmico de los techos verdes y sus interacciones con el rendimiento energético del edificio. También se utilizaron para realizar comparaciones con los resultados numéricos y, por lo tanto, validar los modelos matemáticos desarrollados. El edificio con techo convencional tiene las mismas características de los dos edificios que terminados con los dos techos verdes. El albedo del techo convencional es de 0,65. Los resultados sugieren que el impacto del proceso de transferencia de calor a través de un techo verde es diferente del encontrado en un techo convencional. Los perfiles de temperatura cambiaron de manera significativa debido a la presencia de vegetación y de sustrato en el techo. El objetivo fue evaluar el impacto de un techo verde en el rendimiento energético del edificio experimental con esta tecnología. El techo verde estudiado es el

de vegetación tipo Tundra (*Sedum* sp.). Se realizaron simulaciones utilizando el software TRNSYS, tanto para el techo convencional como para los edificios con techo verde y se comprobó que la temperatura de la superficie exterior de la membrana con techo verde osciló entre 10 y 12 °C en el día frío y entre 22 y 24°C en el día caluroso; mientras que los mismos casos con techo tradicional presentaban oscilaciones de 2 a 11°C y de 24 a 42 °C, respectivamente. La demanda de calefacción fue de 150 kWh/m²/año sin diferencias marcadas entre el caso con cubierta tradicional y el caso con cubierta vegetada, en cambio, en el enfriamiento se observaron reducciones de más del 90% del consumo de energía con la aplicación de techos verdes durante dos días típicos. Se consideró para la temporada de invierno un día frío (16 de enero) y para la temporada de verano un día caluroso (22 de julio). El efecto de cualquier sistema de energía de construcción pasiva depende de las condiciones climáticas externas. Esto es especialmente cierto para los techos verdes, donde muchos parámetros del sistema dependen del clima (por ejemplo, índice de área foliar, albedo, características ópticas).

Uso de simuladores para escenarios a escala urbana con techos verdes

A escala urbana es significativo el impacto negativo de las altas temperaturas de aire, superiores a las del confort térmico humano tanto en los espacios interiores como exteriores, e incide en el rendimiento energético de los edificios (Mavrogianni et al., 2011; Santamouris, 2007; Santamouris, et al., 2015; Vardoulakis et al., 2013). En general los investigadores han prestado atención a los parámetros clave que gobiernan las bases energéticas del fenómeno isla de calor urbana, pero también al establecimiento de estrategias adecuadas de mitigación y adaptación (Akbari et al., 2016; Gago et al., 2013; Santamouris, 2015). Aunque tradicionalmente, la investigación del microclima urbano se ha realizado por medios de observación (Blocken, 2015), los avances significativos en los recursos computacionales de las últimas décadas, han mejorado considerablemente la aplicación de enfoques de simulación numérica que involucran (a) la dinámica de fluidos computacional y b) los modelos de balance de energía térmica (Mirzaei & Haghighat, 2010). La base de la creación de modelos numéricos de microescala se basa en las complejas interacciones entre el tejido urbano (es decir, los edificios y las superficies del terreno) y los parámetros meteorológicos locales; en principio, la radiación solar, que incluye la radiación directa, difusa y reflejada; junto con los patrones de flujo de aire y la transferencia de calor de las superficies urbanas al aire que se consideran en dichos modelos (Mirzaei, 2015).

En este contexto, una de las herramientas de simulación dinámica más utilizadas para el análisis de microclimas (Toparlar et al., 2017) es el modelo ENVI-met, desarrollado por Michael Bruse en la Universidad Ruhr de Bochum (Bruse & Fleer, 1998). El primer lanzamiento oficial del modelo se remonta a 1998 y hasta 2017, más de 1900 usuarios registrados en todo el mundo lo han utilizado para la investigación de microclimas. En marzo de 2018, se identificaron casi 280 artículos respectivos en la base de datos Scopus. El 68% de ellos se refiere a artículos publicados en revistas científicas, mientras que el 31% restante y el 1% corresponden a artículos de conferencias y capítulos de libros respectivamente, siendo que el 77% del total de estudios ENVI-met se ha publicado durante los últimos cinco años (Tsoka et al., 2018).

En la mayoría de los estudios existentes, el modelo se ha aplicado, no solo para la investigación de las condiciones microclimáticas actuales, sino también para la evaluación comparativa del desempeño de varias estrategias de mitigación de la isla de calor urbano (UHI). Paralelamente, otros estudios científicos han utilizado el modelo ENVI-met para la investigación de la calidad del aire centrada en la deposición y dispersión de contaminantes (Mahdavinejad et al., 2018; Paas & Schneider, 2016; Vos et al., 2013; Wania et al., 2012). La mayoría de los estudios se han realizado en Europa y en Asia, y en menor medida en Australia. En el caso de África, los estudios relevantes se han realizado principalmente en la parte norte del continente (Egipto, Argelia y Marruecos). En términos de los estudios asiáticos, la gran mayoría de ellos (casi el 60%) involucran áreas de estudio de casos en China, mientras que otro 9% ha analizado las condiciones microclimáticas de las áreas urbanas en Corea del Sur. Finalmente, en Europa, se ha encontrado un total de 95 estudios ENVI-met, el 21%, 19%, 18% y 6% de los cuales se han llevado a cabo en Alemania, Italia, Grecia y el Reino Unido, mientras que se han encontrado pocos estudios escandinavos y franceses. En lo que respecta a la clasificación climática, la parte más importante de la investigación realizada por ENVI-met se ha realizado en áreas caracterizadas por un clima subtropical húmedo, que corresponde al 25,3% de los estudios. Esto se puede explicar por la contribución significativa de los estudios chinos, cuyas áreas de estudio de casos se ubican en la parte sur y sureste del país, en las que prevalece el clima subtropical húmedo. Una parte considerable de las aplicaciones ENVI-met también se ha realizado en condiciones climáticas cálidas del Mediterráneo, que se producen en países del sur de Europa como Italia, Grecia y Portugal, con un 19,8% de la muestra. Finalmente, la tercera parte más importante de la muestra corresponde al clima marino/oceánico (es decir, 17.1% de la muestra) que se encuentra principalmente en el este y el centro de Europa.

Los cambios en el microclima urbano debido al aumento de la urbanización y el aumento inducido de la temperatura del aire impactan en la calidad de vida de los ciudadanos en términos de confort térmico (Lee et al., 2013; Laureti & Battisti, 2017; Taleghani & Berardi, 2017) y, por otro lado, en las condiciones climáticas interiores (Kolokotsa et al., 2017; Morakinyo et al., 2016; Shahidan et al., 2012) y en las necesidades de energía auxiliar de calefacción y refrigeración del edificio (Gobakis & Kolokotsa, 2017; Kolokotsa et al., 2016; Yang et al., 2012). Según Tsoka et al. (2018), dada la importancia del tema, una gran cantidad de estudios científicos han aplicado el modelo de microclima ENVI-met para evaluar el impacto de diferentes estrategias de mitigación hacia la mejora del entorno termal urbano y sus efectos implícitos. Hasta la fecha, los escenarios de intervención que se han investigado en su mayoría con el modelo ENVI-met forman parte de los siguientes grupos: (a) La adición de vegetación urbana, como líneas de árboles en paralelo al trazado de las calles, parques, plazas, áreas de césped o techos verdes, (b) La aplicación de materiales selectivos fríos en el suelo y en las superficies de la envolvente edilicia, (c) la aplicación combinada de materiales fríos y vegetación urbana, y (d) técnicas de mitigación a base de agua tales como rociadores, estanques y fuentes.

El efecto benéfico de la infraestructura verde en el microclima de las ciudades, ya sea como parte del paisaje urbano o implementado las envolventes de los edificios se ha discutido ampliamente (Bowler et al., 2010; Gago et al., 2013; Santamouris, 2015; Tzoulas et al., 2007; Wang et al., 2014).

En este contexto, el modelo de microclima ENVI-met se ha aplicado ampliamente para examinar el impacto positivo de varias infraestructuras verdes urbanas en el entorno térmico exterior. Se identificaron 49 estudios ENVI-met, que evaluaron el efecto de enfriamiento del enverdecimiento urbano y se recopilaron y analizaron sus resultados de simulación. La mayoría de ellos se centran en el potencial de enfriamiento de los árboles de la calle (es decir, 19 estudios) y los techos verdes (16 estudios), mientras que la aplicación única de pasto ha sido evaluada solo por cinco trabajos científicos. Finalmente, la combinación de árboles con techos verdes o con zonas parquizadas se ha discutido en diez de los artículos identificados. Los escenarios de vegetación examinados corresponden a diferentes Relaciones de Cobertura Verde (GCR) o Cobertura Verde Urbana (UGC), o a elementos verdes que tienen diferentes características de plantas, como altura, densidad de follaje, etc. El indicador común para árboles y plantas, utilizado en las versiones anteriores de ENVI-met es el Índice de Área Foliar (LAI). La última versión de ENVI-met utiliza la Densidad del Área de la Hoja (LAD) para la caracterización de las plantas, derivada del Índice del Área de Área Foliar en 10 intervalos a lo largo de la altura de la planta (Skelhorn et al., 2014). El rango de la reducción máxima y promedio de la temperatura de aire a la altura del peatón se ha calculado para la adición de árboles en las calles y para los techos verdes. Con respecto a la aplicación de césped y el uso combinado de árboles, techos verdes o césped, la muestra de los proyectos existentes es limitada, pero con resultados aplicables.

En comparación con la adición de árboles en las calles, el potencial de enfriamiento de los techos verdes en el ambiente, en el nivel de los peatones, es significativamente más bajo. La caída máxima reportada de la temperatura del aire oscila entre 0.10 °C y 1.70 °C, con el valor de la mediana correspondiente cerca de 0.30 °C. Además, la reducción de la temperatura de aire promedio en el área promedio no supera los 0,90 °C y el valor mediano correspondiente se encuentra cerca de los 0,10 °C. En términos del tipo de vegetación, el tipo de techo intensivo parece presentar un mayor potencial de control de la temperatura ambiente que el tipo extensivo. (Morakinyo et al., 2017; Peng & Jim, 2013). Puede decirse así que, a pesar de la contribución de los techos verdes en la reducción de la temperatura de la superficie del techo y la respectiva disminución de la liberación de calor sensible hacia la atmósfera, el potencial de mitigación a nivel urbano ha sido bastante menor. Más precisamente, los resultados existentes han indicado que la advección vertical del aire frío generado disminuye a medida que aumenta la distancia vertical entre el techo y el suelo. Como resultado, el efecto de enfriamiento respectivo de los techos verdes es más prominente en las áreas de poca altura mientras que en los distritos de gran altura, solo se han informado cambios insignificantes en temperatura del aire (Jin et al., 2017; Ng et al., 2012; Peng & Jim, 2013; Wang et al., 2016; Zölch et al., 2016).

CAPÍTULO 3: RESPUESTA BIOLÓGICA DE CUBIERTAS VEGETADAS EN ZONAS ÁRIDAS

RESUMEN

El establecimiento, crecimiento y permanencia de la vegetación en zonas áridas se enfrenta a restricciones de recursos, siendo el hídrico el más limitante, debido a las condiciones ambientales imperantes. A nivel mundial es muy difundido el uso de especies del género *Sedum*, no obstante, poco se conoce del comportamiento de especies nativas en cubiertas vegetadas, que son de mejor adaptación y menor mantenimiento. Este capítulo compara especies utilizadas internacionalmente, respecto a especies nativas e introducidas de mayor disponibilidad local para Mendoza-Argentina, en base a respuestas eficientes en términos biológicos. Metodológicamente se realizó un método de selección de especies, luego se valoraron en un ensayo experimental bajo condiciones controladas, donde se midió variables ecofisiológicas tales como cobertura vegetal, conductancia estomática, temperatura foliar y consumo de agua. Los resultados indican que la construcción de una cubierta vegetada en otras zonas geográficas y climáticas, con especies muy utilizadas internacionalmente, no siempre es lo adecuado a nivel regional, en cuanto a consumo hídrico y adaptación. Por tanto, se han detectado especies de disponibilidad local y de bajo requerimiento hídrico con potencial de incorporación para cubiertas vegetadas en ciudades de zonas áridas.

Metodología de investigación de respuesta biológica de cubiertas vegetadas

La selección de especies vegetales de mejor aptitud para cubiertas vegetadas emplazadas en el contexto árido local -baja disponibilidad del recurso hídrico con veranos cálidos y secos-, siguió dos procesos metodológicos. Primero se siguió una metodología mediante ponderación teórica en base a las características que le brindarían aptitudes apropiadas para adaptarse al sistema. Una vez puntuadas las especies, aquellas de mayor ponderación fueron elegidas para ser evaluadas en forma práctica en ensayos experimentales a campo, de modo tal de evaluar su comportamiento en el sistema de implantación -cubierta vegetada- y en el área de estudio.

Una vez cumplido este proceso, las cubiertas vegetadas con las especies seleccionadas se evaluaron en términos de su respuesta biológica para luego probar su comportamiento térmico a escala edilicia y urbana.

De este modo se postulan las cubiertas vegetadas con aquellas especies que presentan adecuada expresión vegetativa, adaptación a las condiciones de crecimiento impuestas por el sistema y que, además, genere los mayores beneficios energético-ambientales con un uso eficiente de los recursos disponibles.

A. CASOS DE ESTUDIO

El rol de las especies vegetales es fundamental para la sostenibilidad de un sistema de cubierta vegetada y más aún en el contexto local de aplicación, donde la escasez del recurso hídrico y la aridez imperante exigen una cuota de riego mínima para garantizar la supervivencia. Si bien la bibliografía postula que las especies de mayor consumo de agua, presentan numerosos beneficios ambientales por tener una mayor apertura estomática, mayor aporte de oxígeno y fijación de CO₂ (Taiz & Zeiger, 2003). Por lo tanto, pueden generar un mayor enfriamiento evaporativo. No obstante, dadas las limitantes geográficas y ambientales del área de estudio, es imprescindible que la elección de las especies que conformen los casos de estudio sean de bajo requerimiento hídrico y de alto potencial de adaptación al sistema (Codina et al., 2003; Fioretti et al., 2010; Villagra et al., 2011 Vijayaraghavan, 2016).

A.1. SELECCIÓN DE ESPECIES PARA CUBIERTAS VEGETADAS

El proceso de selección de las especies posibles de ser incorporadas a cubiertas vegetadas insertas en zonas áridas, se inició a través del análisis de un universo de 34 especies que se presentan en la Figura 6:



Figura 6: Universo de análisis de especies vegetales.

Estas 34 especies se eligieron en base a una vasta revisión bibliográfica complementada con entrevistas a profesionales especialistas en paisajismo xérico y con viveristas locales que comercializan plantas de bajo consumo hídrico (Jiménez et al. 2014; Razzaghmanesh et al. 2014).

Los requisitos y atributos buscados para ponderar su aptitud para el sistema de cubierta vegetada extensiva se encuentran en la Tabla 1. Estas 13 (trece) variables buscan además de la selección de especies adaptadas a la aridez, elegir opciones que ofrezcan una compatibilidad con el hábitat construido de modo tal de que el crecimiento de las especies no supere la capacidad portante estructural de la edificación. Por otro lado, es importante asegurar una alta capacidad de sobrevivencia a las limitantes ambientales locales y condiciones de cultivo restrictivas por factores de estrés biótico o abiótico debido entre otras, a la limitada profundidad de sustrato, a la intensa radiación solar y a la baja humedad relativa.

Id.	Variable	Peso	Puntuación		
			No tolera (1)	Tolera (2)	Adaptada (3)
I ₁	Receso vegetativo invernal	5	No tolera (1)	Tolera (2)	Adaptada (3)
I ₂	Requerimiento hídrico	5	Altos (1)	Medios (2)	Bajos (3)
I ₃	Poder tapizante	3	Mala (1)	Buena (2)	Muy buena (3)
I ₄	Velocidad de crecimiento	1	Lento (1)	Intermedio (2)	Rápido (3)
I ₅	Porte de la planta	5	Grande (1)	Mediano (2)	Bajo (3)
I ₆	Facilidad de reproducción	3	Difícil (1)	Buena (2)	Muy buena (3)
I ₇	Órgano reservante	4	No presenta (1)	Presenta ocasionalmente (2)	Presenta (3)
I ₈	Peligrosidad de convertirse en maleza	5	Alto (1)	Medio (2)	Bajo (3)
I ₉	Requerimiento de mantenimiento	5	Alto (1)	Medio (2)	Bajo (3)
I ₁₀	Adaptación a la exposición solar	4	Difícil (1)	Buena (2)	Muy buena (3)
I ₁₁	Exigencias de suelo	3	Muy exigente (1)	Poco exigente (2)	No exigente (3)
I ₁₂	Resistencia a la sequía	5	No resistente (1)	Resistente (2)	Muy resistente (3)
I ₁₃	Generación de molestias a los transeúntes	5	Alta (1)	Baja (2)	Ninguna (3)

Tabla 1: Indicadores utilizados para evaluar las especies vegetales, peso de ponderación y forma de puntuación.

El procedimiento para la selección de especies apropiadas que muestren un mejor comportamiento para su evaluación en ensayos experimentales, consistió en la valoración y ponderación en una escala reducida (1 a 5) donde el valor 1 es el mínimo e indica menor importancia de la variable o indicador, mientras que el valor 5 es el máximo e indica la mayor importancia (Tabla 1). Dichos indicadores y su peso se describen a continuación:

1. Receso vegetativo invernal

El objetivo inicial de aplicar una tecnología de cubierta vegetada eficiente energética y ambientalmente, implica que las especies tengan un crecimiento adecuado en verano y se comporten también con eficiencia térmica durante el invierno. En días de verano, en los que es necesario que el flujo calórico se libere al exterior hacia zonas de menor temperatura y permita el enfriamiento nocturno de la estructura, generando así un ambiente más confortable para el hombre. Este material debe lograr tener la máxima conductividad térmica de modo poder conducir el flujo de calor interno hacia el exterior. La velocidad de transmisión del flujo de calor es función de la diferencia de temperatura entre el punto de origen y el punto de destino. Al estar el techo verde beneficiado por los efectos de evapotranspiración del cultivo, permite una temperatura menor en la superficie del mismo, comparada con un techo desnudo. Esta mayor diferencia de temperatura, acelera la velocidad de enfriamiento por conducción del interior del local debajo del techo considerado. La conducción a través de la capa de sustrato es función de la composición y del contenido hídrico, o a la inversa, del contenido de aire. A mayor contenido hídrico, mayor conductividad y viceversa debido a la interrupción del flujo de calor por obstáculos que cumplen los espacios de aire en los intersticios del sustrato. Por lo antes explicado, una especie que tenga receso invernal no requiere riego en esa estación y permitiría que el sustrato permanezca con menor contenido hídrico. Consecuentemente, esto significa que tendrá mayor contenido de aire y mayor efecto aislante en invierno, sin perder los beneficios que aporta durante el verano.

Las especies que presenten esta condición permiten una mayor ganancia solar directa durante el invierno debido a la mayor penetración de los rayos solares por ausencia o disminución de la parte aérea de la planta. A esta variable se le ha dado un peso de 5

(máximo) en la ponderación debido al rol que tiene esta variable en la eficiencia térmica de la cubierta vegetada.

2. Requerimiento hídrico

Las especies a integrar estos sistemas deber resistir un índice de aridez (I) -valor que refleja la medida en que las lluvias pueden cubrir las necesidades evapotranspiratorias- del orden de 0,174 para la ciudad de Mendoza (período 1951-2000) que corresponde al bioclima árido inferior con una concentración del 76% de los 198 mm/año de precipitación entre octubre y marzo (González Loyarte et al., 2009). Esta característica corresponde al sector de travesías y llanuras de Mendoza, donde las precipitaciones se concentran en el verano a consecuencia de la incidencia del anticiclón semipermanente del Océano Atlántico (Norte, 2000). Para la ciudad de Mendoza, cuando al cálculo del Índice de Aridez se adicionan por riego 800 mm, se logran resultados correspondientes a condiciones bioclimáticas de clima húmedo o subhúmedo ($I > 0,75$) (González Loyarte et al., 2009).

La implantación de especies vegetales en entornos urbanos, periurbanos y rur-urbanos ha tomado relevancia, aun cuando persistan limitaciones para el establecimiento y mantenimiento bajo situaciones de estrés hídrico. Si la disponibilidad de agua superficial o subterránea es el principal factor que limita la distribución natural de la vegetación en zonas áridas y semiáridas (FAO, 2002), con más razón lo será para espacios vegetados con especies exóticas de mayores requerimientos hídricos. En estos casos la distribución e implantación dependerá exclusivamente de la provisión adicional de agua de riego, asociada a un eficiente sistema de conducción. Considerando los pronósticos de calentamiento global dados por el IPCC (2017), es fundamental seleccionar especies resistentes a sequía para ser incorporadas al ecosistema urbano- tanto autóctonas como introducidas- y su capacidad de adaptación a recursos hídricos limitados, mediante el conocimiento de su comportamiento y el uso apropiado de distintas especies (Schulte et al., 1992; Carrieri et al., 1996; Márquez & Dalmasso, 2003). Dados los antecedentes previos, es importante conocer la ecología de las especies usadas en cubiertas vegetadas y cómo éstas se adaptan a eventuales condiciones de sequías, riegos deficitarios y estrés hídrico, para asegurar su sustentabilidad (Fioretti et al., 2010; Vijayaraghavan, 2016).

Para las especies a proponer en las cubiertas vegetadas es deseable que su requerimiento hídrico esté en el rango de 200 a 400 mm anuales, de modo que las alternativas seleccionadas promuevan un balance adecuado entre crecimiento, dinámica y estructura urbana, y una alta eficiencia de utilización de los recursos disponibles (agua-sustrato-aire). Por ello, en un modelo de ciudad bajo clima árido, la sustentabilidad de las nuevas estructuras vegetadas donde el recurso hídrico es escaso, es fundamental el uso de especies de bajo requerimiento hídrico que no generen competencia por el uso prioritario que tiene el agua para la población. Debido a la escasez de este recurso se le ha otorgado un peso máximo de 5 a esta variable.

3. Poder tapizante

La cobertura vegetal representa un indicador de crecimiento y adaptación de las plantas a las condiciones ambientales. El concepto describe la ocupación espacial de distintos elementos vegetativos distribuidos sobre un determinado territorio (López Granados et al., 2002). En el caso de las cubiertas vegetadas, la cobertura vegetal desarrollada por las

especies, es una de las características más buscadas a nivel internacional para garantizar que el sustrato esté cubierto y el sistema tenga la mayor eficiencia ambiental.

Este indicador considera la expresión vegetativa de las especies, su brotación y emisión de hojas, flores y frutos, y su producción de biomasa, que crean una canopia con funciones fotosintéticas y evapotranspiratorias, que además de proteger el sustrato aportan los beneficios térmicos buscados. En el contexto local, además, hay ocurrencia de vientos de velocidad moderada a alta que podrían generar grandes erosiones en el sustrato descubierto. Por tanto, considerar una alta cobertura en la totalidad de la superficie destinada a cubiertas vegetadas determina que éstas funcionen eficientemente respecto al sistema planta-sustrato-capa drenante-capa impermeabilizante (Niachou, 2001; Sailor, 2008).

A esta variable se le ha dado un peso de 3 dado el supuesto que, si bien es fundamental para la sostenibilidad del sistema, se podría garantizar la cobertura total aumentando la densidad de plantación.

4. Velocidad de crecimiento

El crecimiento es definido generalmente como un incremento irreversible en las dimensiones de la planta. La tasa o velocidad de crecimiento es la acumulación de biomasa en un periodo determinado de tiempo (Di Benedetto & Tognetti, 2016). Durante el crecimiento, la formación de los tejidos de las plantas sigue básicamente tres pasos: la división (o mitosis) de las células embrionarias para formar nuevas células, el agrandamiento y/o alargamiento de estas células y su diferenciación final en células con una función específica, ya sean vasos, células fotosintéticas, almacenadoras, epidérmicas, etc., que desempeñarán su función durante el resto de su existencia ya sea en forma viva o no, dependiendo de cuál sea el tejido u órgano que se esté desarrollando.

El ciclo de crecimiento implica que, una vez realizada la plantación, éstas experimentan un período de rusticación o adaptación a las nuevas condiciones de cultivo. La velocidad de crecimiento determina qué tan rápido las especies, luego de dicha rusticación y establecimiento definitivo, cubren o tapizan el espacio destinado. O bien con qué rapidez luego de una poda de renovación o mantenimiento, o alguna adversidad climática (granizo, helada o sequía prolongada) o fitopatología específica, pueden rebrotar y recuperarse en poco tiempo. En general, estos eventos en la zona urbana de estudio no presentan una alta frecuencia por lo que, para el caso de su ponderación para cubiertas vegetadas, a esta variable se la ha otorgado un peso mínimo de 1.

5. Porte de la planta

Las plantas pueden clasificarse en función de su tamaño final en árboles, arbustos, matas o subarbustos y hierbas (Bollinger et al. 2005).

Los *árboles* son plantas perennes que poseen el tronco leñoso y ramifican a cierta altura del suelo. Son considerados como plantas leñosas por el hecho de que tanto su tronco como sus ramas experimentan una lignificación, generando como consecuencia el aumento de su diámetro. Esta condición permite mayor crecimiento respecto a otras plantas y así pueden, para sostener el gran peso de sus copas. Por lo general, los árboles hacen referencia a plantas que superan los 5 metros de altura y de gran longevidad.

Los *arbustos* son plantas leñosas y perennes, con procesos de lignificación. Han desarrollado diversas maneras de crecimiento. Por lo general, tienen numerosas raíces y poseen menor tamaño que los árboles (miden entre 1 y 3 metros de altura). La diferencia más notoria entre un árbol y un arbusto es que estos últimos comienzan a ramificarse desde la base; no existiendo, una clara diferenciación del tronco y la copa como en los árboles.

En los arbustos el crecimiento es fomentado por las yemas próximas al suelo y las que están dispuestas en lo más alto retardan su desarrollo.

Las *matas*, conocidas también como “*subarbustos*” o “*subfrútices*”, representan la transición entre arbustos y plantas herbáceas. Poseen uno o varios tallos leñosos, pero tienen menor tamaño que los arbustos y generalmente no sobrepasan el metro de altura. Las partes leñosas, lignificadas, están solo en la base y las partes herbáceas se elevan sobre ella, por lo que la apariencia arbustiva se mantiene sólo en la base.

A las *hierbas* también se les denomina *plantas herbáceas*. Desde el punto de vista botánico, se caracterizan por ser plantas pequeñas, con semillas, que pueden sobresalir solamente a escasos centímetros del suelo o llegar a alcanzar hasta varios metros de altura; por lo general su vida es corta y no desarrollan tallos lignificados. Se le denomina herbácea a la planta o estructura que es más carnosa que leñosa, por lo que su tallo es flexible y puede quebrarse con cierta facilidad. En su mayoría, las plantas herbáceas presentan un rápido crecimiento.

El indicador porte de la planta, define el tamaño final de las mismas. En una forma simplificada, representa la altura, el diámetro y el peso que ocupa la especie vegetal incorporada a la estructura edilicia.

Se considera que, a mayor porte, mayor peso para la capacidad portante de la construcción. Por otro lado, las especies que debido a su porte superen el parapeto de la cubierta del edificio se verían más expuestas a la incidencia de vientos.

Como es una variable que puede condenar al sistema con plantas de gran altura que sean dañadas por viento o muy pesadas que superen la capacidad de carga del techo se le ha dado un peso de 5.

6. Facilidad de reproducción

La facilidad de reproducción de las plantas no debe ser una limitante para la difusión de las nuevas tecnologías verdes. La persistencia de las especies en el tiempo se logra mediante el ajuste de los organismos a su ambiente abiótico (condiciones y recursos) y biótico (organismos de la misma especie y de otras especies), con lo que consiguen no sólo sobrevivir, sino también perpetuar sus genes, tanto a través de la propagación asexual y la reproducción sexual (Jiménez Sierra, 2010).

Algunas especies de plantas con flores (angiospermas) han desarrollado mecanismos de propagación asexual exitosos, en los que células de un individuo pueden producir otros individuos idénticos al progenitor. Esto sucede cuando secciones de un tallo son capaces de enraizar y formar otro organismo independiente. Los individuos así generados son genéticamente idénticos a sus progenitores. La propagación asexual ha sido de especial importancia en vegetales que viven en ambientes extremos y donde se presentan

limitaciones ambientales para que la reproducción sexual sea exitosa. Su principal ventaja radica en que es una forma económica de producir descendientes, ya que no se gasta energía ni recursos en la formación de flores y frutos, y presenta la ventaja de que la información genética del progenitor pasa completa a su descendencia (Eguiarte, et al., 1999).

En la reproducción sexual interviene la fecundación y germinación de semillas. Es un proceso más costoso ya que se requiere de recursos y energía destinada a consolidar la maduración del embrión y las sustancias que lo nutrirán después de la germinación. A pesar de estos costos, la reproducción sexual presenta grandes ventajas a nivel poblacional, ya que con ella se incrementa la velocidad de adaptación o ajuste de las poblaciones a los cambios ambientales (Maynard-Smith, 1978).

La facilidad de reproducción de las especies a emplear en este caso, es un indicador de la posibilidad de multiplicarlas y lograr que las mismas se encuentren disponibles. Esta variable busca asegurar la disponibilidad en el mercado de ejemplares en cantidad y calidad, al momento de implantar la cubierta. Se le ha otorgado un peso de 3 debido a que su importancia es intermedia dado, seleccionar especies de difícil reproducción, es un problema que se puede solucionar previamente en viveros especializados.

7. Órgano reservante

El modelo estructural básico de las plantas superiores (raíz, tallo y hoja) en ocasiones presenta, además de la variabilidad en el aspecto externo, que es causada por diferentes modos de ramificación y simetría, una multitud de formas de los órganos vegetativos aumentada por modificaciones morfológicas. Estas modificaciones o adaptaciones están relacionadas con el ambiente en el que se desarrolla la planta, algunas son la acumulación de reservas y la existencia de mecanismos de multiplicación vegetativa (Strasburger et al., 1994; Purves et al., 2003). Entre ellos se encuentran: estolones, rizomas, tubérculos, raíces, bulbos.

Los *estolones* son ramas laterales, delgadas, a menudo muy largas que nacen de la base de algunos tallos. Pueden desarrollarse arrastrándose por la superficie de la tierra y constituyen estolones epigeos; o bien pueden hacerlo por debajo del suelo formando estolones subterráneos.

Los *rizomas* son tallos subterráneos reservantes, con crecimiento horizontal que carecen de hojas propiamente dichas capaces de asimilar o transpirar; en su lugar hay catáfilos, la mayoría de las veces en forma de escamas membranosas. Durante el período del año desfavorable a la vegetación, en los países con inviernos fríos o con estaciones excesivamente secas, el rizoma defiende a la planta contra los rigores del ambiente.

Los *tubérculos caulinares* son tallos subterráneos engrosados con función de reserva. Se distinguen de los rizomas por su considerable grosor y por su crecimiento limitado.

Los *tubérculos radicales* son producidos por algunas plantas herbáceas bianuales y perennes. Con frecuencia se asemejan a los tubérculos caulinares, pero se diferencian de ellos por la falta de hojas y yemas axilares y por su estructura anatómica. Se desarrolla por transformación de raíces adventicias que detienen su crecimiento en longitud y no desarrollan raíces laterales. Todos los tubérculos radicales realizan la función de

almacenamiento en el parénquima cortical, que está muy engrosado a consecuencia de procesos de crecimiento primario.

Los *bulbos*, son órganos subterráneos de almacenamiento de nutrientes. Las plantas que poseen este tipo de estructuras de reserva se denominan colectivamente plantas bulbosas. Producen bulbillos que sirven para reproducir las plantas, una vez que han alcanzado el tamaño suficiente.

Las plantas que presenten un órgano reservante tienen la oportunidad de rebrotar luego de que un factor de estrés (defoliación, sequía, ataque de plagas o enfermedades, etc.) afecte la parte aérea, e inclusive produzca su necrosis o muerte y la dañe severamente. Esta presencia les otorga una ventaja competitiva frente a aquellas especies carentes de la misma, ya que en una cubierta vegetada consolidada que por alguna causa pierda su parte aérea, si no cuenta con órganos reservantes, sólo tendrá la posibilidad de recuperarse si se realiza un nuevo replante o resiembra. Debido a esto a la variable se le asigna un peso de 4.

8. Peligrosidad de convertirse en maleza

Aquellas plantas que interfieren en forma negativa con la actividad humana en áreas cultivables y no cultivables son consideradas malezas. Muchas plantas comúnmente clasificadas como malezas pueden ser utilizadas para fines alimenticios o medicinales, como, por ejemplo: *Portulaca oleracea* L. y *Petiveria alliacea* L. entre otras. En cultivos agrícolas las malezas, como producto de la alteración de la vegetación natural, son plantas indeseables y, posiblemente, constituyen el componente económico más importante del total del complejo de plagas, que también incluye insectos, ácaros, vertebrados, nemátodos y patógenos de plantas. Las pérdidas anuales causadas por las malezas en la agricultura de los países en desarrollo han sido estimadas en el orden de 125 millones de t de alimentos, además de facilita el aumento de la densidad de otras plagas y al final los rendimientos agrícolas y su calidad decrecen (Parker & Fryer, 1975). En cuanto al costo económico extra, según estimaciones del Proyecto Nacional de Malezas de la Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola, se invierten entre 700 y 1.100 millones de dólares al año para el control (INTA, 2016).

Las malezas compiten con las plantas cultivables por los nutrientes del suelo, agua y luz. Sirven de hospederas a insectos y patógenos dañinos a las plantas cultivables. Sus exudados radicales y lixiviados foliares resultan ser tóxicos a las plantas cultivables. Y al momento de la cosecha las semillas de las malezas contaminan la producción obtenida.

La preparación del terreno y las labores de cultivo en el ciclo de las plantas cultivables tienen como objetivo principal el combate de malezas.

El control de malezas no desarrollado a tiempo puede causar serios problemas, no sólo a las áreas cultivables, donde inciden, sino también a áreas vecinas.

Aquellas plantas que presenten semillas de fácil dispersión y establecimiento en áreas no deseadas, pueden convertirse en malezas agresivas e invasoras en espacios verdes tradicionales ya sean públicos o privados, representando un riesgo ecológico en los cultivos, y comprometiendo su productividad. La práctica del desmalezamiento, una vez producida la invasión, implica altos costos de manejo para su control y el restablecimiento de los cultivos. Por ello, esta variable tiene un peso máximo de 5.

9. Requerimiento de mantenimiento

Según Minke (2009), cuando la vegetación se encuentra totalmente establecida, la construcción del techo ha sido correctamente ejecutada, y además no han surgido períodos largos de sequía, no es necesario un mantenimiento frecuente de la vegetación. Los requerimientos de mantenimiento -para el caso de estudio- implican eliminar las malezas o arbustos más altos que crezcan sobre el techo, aplicar los riegos establecidos no en exceso, ya que esto trae aparejado, por un lado, el peligro de que se seque demasiado rápido y por otro, que se pierda materia orgánica. Si se corta muy a menudo, el sustrato debería ser abonado para mantener el equilibrio ecológico.

El mantenimiento del cultivo que se realice para ajardinar los techos debe ser el mínimo posible debido no solo a los costos que ello produciría en mano de obra requerida, sino también a que son zonas riesgosas de trabajo y muchas veces de difícil acceso. El peso asignado a este indicador es máximo (5).

10. Adaptación a la exposición solar

La radiación solar controla el funcionamiento de los ecosistemas terrestres y acuáticos tanto a través del control de procesos fotobiológicos (fotosíntesis, fotoperiodo, fototropismos, etc.) como por medio de su acción sobre otros factores ambientales (temperatura, humedad, etc.) y ciclos naturales (ciclos diarios, anuales, hídricos, etc.) que inciden en la distribución de los organismos.

La radiación que llega a la Tierra abarca una amplia gama del espectro electromagnético y aproximadamente el 40% de ella es como luz o radiación visible. Esta comprende longitudes de onda que van de los 400 a los 700 nm, rango denominado radiación fotosintéticamente activa o PAR (sigla derivada del inglés: photosynthetic active radiation). Otro rango de esta radiación electromagnética es el que va de los 280 nm a los 1000 nm, conocido como rango fotobiológico ya que comprende longitudes de ondas más allá de la radiación PAR y que son de importancia en otros procesos fotobiológicos bajo control de fotoreceptores específicos como por ejemplo los fitocromos.

Esta radiación solar, puede ser perjudicial en altas intensidades o cuando la proporción de ondas cortas aumenta por sobre determinados límites. Altas intensidades de radiación y cambios en la composición espectral pueden afectar importantes procesos en los vegetales. Uno de los principales cambios que ha sucedido ha sido el aumento de la radiación UV-B (Blumthaler & Ambach, 1990). Producto de la alteración de la capa de ozono por compuestos contaminantes.

Si bien la radiación ultravioleta-B comprende una pequeña región del espectro electromagnético, su acción sobre plantas y animales es considerable debido a que importantes biomoléculas como proteínas y ácidos nucleicos, la absorben fuertemente.

Cambios morfológicos y anatómicos que son inducidos por la radiación UV-B pueden llegar a ser determinantes en las respuestas de las distintas especies vegetales sometidas a un aumento de este tipo de radiación. Las especies monocotiledóneas que presentan hojas delgadas con orientación vertical interceptan menos la radiación UV-B que las dicotiledóneas por presentar hojas anchas y de orientación más bien horizontal, y por lo tanto son más susceptibles al daño (He et al., 1993).

Por otra parte, las plantas aclimatadas a condiciones de alta radiación UV-B, como por ejemplo en alta montaña, se caracterizan principalmente por presentar tallos y ramas cortas, resultando plantas de morfología más bien compacta y de tamaño pequeño (Tevini & Teramura, 1989; Searles et al., 1995; Lin et al., 1998). La disminución de la altura de las plantas expuestas a altas intensidades de radiación UV-B ha sido relacionada directamente con la inducción de entrenudos más cortos en distintas especies (Kakani et al., 2003; Tevini & Teramura, 1989; Searles et al., 1995; Lin et al., 1998).

Los distintos mecanismos de adaptación a radiación UV-B que se han documentado en plantas, hasta la fecha se relacionan esencialmente con estrategias que desarrollan éstas para evitar la penetración de este tipo de luz (Carrasco-Ríos, 2009). Los techos en altura de edificios de alta densidad constructiva se encuentran expuestos a una alta radiación solar y en los casos de mayor altura, no tienen sombreado en las horas de mayor exposición a los rayos solares. Especies que no se adapten a estas condiciones no van lograr sobrevivir, aunque no es la condición general de las azoteas debido a la heterogeneidad de las densidades constructivas en el AMM. Este indicador tiene un peso de 4.

11. Exigencias de suelo

El suelo satisface generalmente las necesidades de la vegetación en su estado natural, teniendo en cuenta las condiciones climáticas y geográficas. Un sustrato, en cambio, se encuentra en cualquier medio que se utilice para cultivar plantas en contenedores o macetas, entendiendo por contenedor a cualquier recipiente que tenga altura limitada y que su base se halle a presión atmosférica. Un contenedor podrá tener dimensiones variables, siempre que exista esta restricción de altura, y se hallará, a diferencia de un suelo natural, aislado por la base y con drenaje libre.

Se define como sustrato a un medio físico, natural o sintético, donde se desarrollan las raíces de las plantas que crecen en un recipiente, sea contenedor, saco, banqueta, maceta, que tiene un volumen limitado. Las principales propiedades físicas y químicas de un sustrato apto para el cultivo dependen de la estructura de los componentes y vienen definidas por la proporción entre partículas de tamaño grande y pequeño, el conjunto de poros y los volúmenes relativos de agua y de aire que ocupan los poros:

Parámetros físicos:

- granulometría, tamaño y proporción de las partículas;
- densidad aparente, masa por unidad de volumen, el volumen de poros;
- densidad real y masa por unidad de volumen de la fase sólida,
- porosidad total o espacio poroso total, % del volumen de poros, llenos de aire y de agua, en relación al volumen total;
- fase sólida (% vol.), diferencia entre 100 y la porosidad total;
- contenido de aire (% vol.) diferencia entre la porosidad total y el volumen de agua medido a 10 cm de tensión;
- agua fácilmente disponible (% vol.), diferencia entre los volúmenes de agua a 10 y 50 cm de tensión;
- agua de reserva (% vol.), diferencia entre los volúmenes de agua medidas a 50 y 100 cm de tensión.

Es asimismo importante el conocer las características químicas del sustrato según los parámetros siguientes: pH; capacidad de intercambio catiónico (CIC); y contenido de sales solubles. Además, se busca que el sustrato reúna las siguientes condiciones:

- acumular y suministrar cantidades suficientes de agua, para permitir intervalos amplios entre riegos;
- tener estructura estable y textura conocida que permita mantener volumen de aire para el sistema radical, incluso si se produce un exceso de riego;
- absorber y retener los nutrientes en forma asimilable para las plantas y tener una buena capacidad amortiguadora para compensar excesos o déficits de nutrientes;
- ser química y biológicamente inerte.

Los sustratos presentan una gama de posibilidad que lo transforman en más o menos inertes, y se usan ampliamente con el propósito de evitar las limitaciones del suelo natural. Se han desarrollado técnicas de cultivo sin suelo, cultivo hidropónico, aeropónico, o vertical que requieren condiciones técnicas, económicas y sociales que son difíciles de encontrar y a veces no son rentables (FAO, 2018).

Este tipo de técnicas se muestran particularmente útiles para el cultivo de ciertas especies exigentes. En ocasiones, la falta de variedad de sustratos disponibles puede ser importante debido a la presencia de recursos orgánicos que aseguren su calidad. Los sustratos mejoran el crecimiento debido a que ofrecen ventajas técnicas, respecto al control de enfermedades y plagas del suelo; al mejor empleo del agua y de los abonos; y al suministro de nutrientes específicos para las plantas, etc. Sin embargo, el uso de estos medios presenta algunos problemas para los cultivos intensivos: baja disponibilidad, altos costos y características limitantes en torno a la tecnología necesaria para realizar el cultivo fuera del suelo natural. Según la bibliografía internacional un sustrato ideal debiera reunir los siguientes parámetros:

- densidad aparente	0,22 g/cm ³
- densidad real	1,44 g/cm ³
- espacio poroso total	85%
- fase sólida	10-15%
- contenido de aire	20-30%
- agua fácilmente disponible	20-30%
- agua de reserva	6-10%
- pH	5,5-6,5
- capacidad de intercambio catiónico	10-30 meq/100 g peso seco
- contenido de sales solubles	200 ppm (2mS/cm)

Las especies vegetales para incorporar en este tipo de cultivo en cubiertas, sin suelo propiamente dicho, deben poder adaptarse a condiciones de limitada fertilidad y contenido de materia orgánica en sustratos artificiales, de modo de asegurar el establecimiento y permanencia de las plantas. Cabe destacar que conceptualmente, en cubiertas de tipo extensivo se encuentra la limitante de la escasa profundidad del sustrato (Minke, 2009). Es decir, las plantas incorporadas al sistema vegetarán durante un prologado período de tiempo en estas condiciones y las tareas para mejorar la calidad del

sustrato se ven dificultadas debido a las limitantes de acceso a la cubierta. Esta situación por lo general, no sucede en las plantas cultivadas tradicionalmente en contenedores o macetas. A este indicador se le ha dado un peso de 3.

12. Resistencia a la sequía

Constituye una estrategia de adaptación a una condición ambiental limitante. La resistencia y/o tolerancia a la sequía depende generalmente de una combinación óptima de distintos caracteres vegetales, como la disminución del área foliar y del tamaño celular, el crecimiento y mantenimiento de la funcionalidad del sistema radical y cambios morfo-fisiológicos que son consecuencia del estrés hídrico. Los mecanismos de adaptación a condiciones de sequía han sido definidos como “escape”, “tolerancia con bajo potencial hídrico” y “tolerancia con alto potencial hídrico” (Turner, 1979 citado por Martínez, 2011).

La característica de bajo requerimiento hídrico se complementa con otra condición que deben cumplir las plantas, de modo de poder resistir períodos prolongados de sequía o riegos discontinuos y deficitarios. Es decir, no solo requerir poca agua, sino también poder adaptarse a esas situaciones de estrés para el vegetal. Cabe recordar que en el área de estudio el recurso hídrico destinado al riego suplementario de espacios verdes es limitado y en los últimos ocho años se ha declarado la emergencia hídrica en dichos períodos sucesivos (DGI, 2017).

Esta condición implica la incorporación de un sistema de riego adicional que complemente las precipitaciones anuales. Al ser una variable que garantiza el éxito del cultivo se le ha otorgado un peso de 5.

13. Generación de molestias a los transeúntes

Los espacios verdes urbanos aportan numerosos beneficios ambientales, sociales y económicos para la población. Sin embargo, en la elección de las especies que se emplean en parques y jardines no se suele considerar su alergenicidad, lo que supone un riesgo para la población alérgica (Nitiu & Mallo, 2002; Lara et al., 2017). Las plantas además pueden generar otras molestias a los transeúntes como ser aromas desagradables o daños físicos por las características del vegetal en sí mismo o de las semillas, las cuales muchas veces tienen características adhesivas o adherentes a través de apéndices espinosos que pueden generar molestias a personas y animales; y que pueden ser fuertemente fijados en las prendas de vestir. Estas condiciones deben evitarse en cultivos realizados en zonas urbanas. Este indicador tiene un peso máximo de 5.

Método de ponderación de indicadores

Una vez descriptos los indicadores se puntuaron las especies de acuerdo a la escala indicada en la Tabla 2 para cada variable. La sumatoria del producto de esa puntuación por el peso de cada indicador determina la puntuación final de la especie como se indica en la Ecuación 1:

$$Puntuación\ final = \sum_{1}^{13} I(Peso * Puntuación)$$

Ecuación 1: Fórmula para puntuación final ponderada por especie

Una vez aplicada la Ecuación 1 para todas las especies del universo de análisis propuesto, se ordenaron de mayor a menor puntuación final como se muestra en la Tabla 2:

Número	Nombre común	Especie	Puntuación final
1	Sedum alfombra	<i>Sedum lineare</i>	2.7358
2	Olivillo	<i>Hyalis argentea</i>	2.7170
3	Perlilla mejicana	<i>Thymophylla pentachaeta</i>	2.6981
4	Sedum reflexum	<i>Sedum reflexum</i>	2.6792
5	Zefirantes	<i>Zephyranthes candida</i>	2.6415
6	Rayito de sol	<i>Lampranthus multiradiatus</i>	2.6415
7	Aptenia, rosa bebé	<i>Aptenia cordifolia</i>	2.6415
8	Bermuda grass, chepica	<i>Cynodon dactylon</i>	2.6226
9	Tomillo	<i>Thymus vulgaris</i>	2.5472
10	Angelita	<i>Hymenoxys acaulis</i>	2.5094
11	Sedum de otoño	<i>Sedum spectabile</i>	2.4717
12	Nassella tenuissima	<i>Stipa tenuissima</i>	2.4717
13	Pañuelito	<i>Oenothera caespitosa</i>	2.4528
14	Coirón común	<i>Jarava ichu (Stipa ichu)</i>	2.4340
15	Verbena papel de lija	<i>Verbena rigida</i>	2.4151
16	Nassella tenuis	<i>Stipa tenuis</i>	2.4151
17	Gazania	<i>Gazania rigens</i>	2.3774
18	Damianita	<i>Chrysactinia mexicana</i>	2.3585
19	Pampajarito	<i>Sedum acre</i>	2.3396
20	Aristida púrpura	<i>Aristida purpurea</i>	2.3208
21	Flor de papel	<i>Psilostrophe tagetina</i>	2.3208
22	Incienso	<i>Encelia farinosa</i>	2.3208
23	Pasto mosquito	<i>Bouteloua gracilis</i>	2.3208
24	Gramilla blanca	<i>Paspalum vaginatum</i>	2.2830
25	Romero rastrero	<i>Rosmarinus officinalis 'Prostratus'</i>	2.2642
26	Santolina	<i>Santolina chamaecyparissus</i>	2.2642
27	Orégano	<i>Origanum vulgare</i>	2.2075
28	Malvisco mejicano	<i>Sphaeralcea ambigua</i>	2.1698
29	Coreopsis	<i>Coreopsis lanceolata</i>	2.1698
30	Euforbia	<i>Euphorbia rigida</i>	2.1698
31	Lechuga	<i>Lactuca sativa</i>	2.1509
32	Aristida	<i>Aristida mendocina</i>	2.1132
33	Senecio	<i>Senecio filaginoides</i>	2.1132
34	Campanita del campo arbustiva	<i>Convolvulus cneorum</i>	2.0943

Tabla 2: Especies analizadas y ponderadas de acuerdo a los indicadores mencionados en la Tabla 1.

La Tabla 3 muestra las 14 especies vegetales que finalmente se seleccionaron en función del diseño experimental planteado, para realizar los ensayos a campo con cubiertas vegetadas con plantas según aquellas enumeradas en la Tabla 3 y, de acuerdo a su ranking en puntaje y disponibilidad en viveros locales.

ID	Nombre común	Especie	Origen	Hábito de crecimiento
1	Sedum alfombra	<i>Sedum lineare</i>	Exótica	Rastrero
2	Olivillo	<i>Hyalis argentea</i>	Nativa	Erguido
3	Zefirantes	<i>Zephyranthes candida</i>	Exótica	Rastrero
4	Rayito de sol	<i>Lampranthus multiradiatus</i>	Exótica	Rastrero
5	Aptenia, rosa bebé	<i>Aptenia cordifolia</i>	Exótica	Rastrero
6	Bermuda grass, chepica	<i>Cynodon dactylon</i>	Exótica	Rastrero
7	Tomillo	<i>Thymus vulgaris</i>	Exótica	Erguido
8	Angelita	<i>Hymenoxys acaulis</i>	Exótica	Erguido
9	Sedum de otoño	<i>Sedum spectabile</i>	Exótica	Erguido
10	Coirón	<i>Nassella tenuissima</i>	Nativa	Erguido
11	Verbena papel de lija	<i>Verbena rigida</i>	Exótica	Rastrero
12	Gazania	<i>Gazania rigens</i>	Exótica	Rastrero
13	Pampajarito	<i>Sedum acre</i>	Exótica	Rastrero
14	Aristida púrpura	<i>Aristida purpurea</i>	Exótica	Erguido

Tabla 3: Especies finalmente seleccionadas para ensayos experimentales.

B. DISEÑO EXPERIMENTAL

Una vez seleccionadas las especies según el criterio del punto A., en una segunda etapa las especies mejor puntuadas se prueban en ensayos experimentales considerando además el método de medición de distintas variables consideradas.

B.1. CUBIERTAS VEGETADAS. MÓDULOS DE ENSAYO DE ESPECIES VEGETALES

Las especies vegetales seleccionadas se evaluaron en términos de crecimiento, en módulos de 1 m² de superficie. Ésta fue considerada como la medida mínima de cultivo que luego posibilitara desde el punto de vista del manejo y su manipulación, la evaluación de las distintas especies vegetales sobre los box experimentales, de modo de analizar el comportamiento térmico de esta tecnología. Como se podrá observar en el Capítulo 4 el diseño de estos módulos contempló que el sistema pudiera ser desacoplable y trasladable a los box experimentales para poder rotar las especies y realizar en ellos las comparaciones y mediciones térmicas.

Por lo tanto, se diseñó un sistema de 3 sacos confeccionados de geotextil, contenedores del sustrato y del sistema radical de las plantas (las dimensiones de cada uno fueron: 100 cm de largo, 33 cm de ancho y 15 cm de profundidad) provisto de asas y con un sistema de riego por goteo subsuperficial integrado y desacoplable también (Figura 7). Esto permitió seccionar el traslado de las cubiertas vegetadas de 1 m² en 3 partes más accesibles y livianas.



Figura 7: Sistema de riego de desacople por sacos con goteo subsuperficial.

La composición del sustrato utilizado contenía arena, orujo agotado y turba negra en iguales proporciones (33% cada componente). Esta selección responde a que es un medio de cultivo ampliamente utilizado y disponible en la región, además de ser de bajo costo y cumplir con los requerimientos nutricionales de cualquier cultivo. Esto le otorga una gran ventaja competitiva desde un punto de vista de fácil y económica implementación.

Para el ensayo planteado -cubierta vegetada del tipo extensivo- se utilizó un espesor de sustrato de 15 cm de modo de otorgarle un medio de cultivo a las plantas que permita su sobrevivencia pero que no supere la capacidad portante de las cubiertas tradicionales de la región. Las principales características del sustrato en su etapa inicial se presentan en la Tabla 4.

<i>Indicador</i>	<i>Variable de sustrato</i>	<i>Valor de laboratorio</i>	<i>Observaciones</i>
Acidez	pH pasta	6.93	Acidez normal
Salinidad	CE s dS/m	3.35	Peligrosidad ligera
Fertilidad y calidad del sustrato	Nitrógeno total mg/kg	4088	Alto contenido
	Fósforo extracción CO ₂ relación 1:10 mg/kg	43.22	Alto - Sin respuesta a la fertilización
	Potasio - AcNh ⁴	755	Alto contenido
	Materia Orgánica	7.85	Alto contenido
	C/N	11.1	Suelo fértil

Tabla 4: Propiedades físico-químicas iniciales del sustrato.

El sistema de riego integrado que se implementó es del tipo presurizado, por goteo subsuperficial, de modo de evitar derivas y lograr la máxima eficiencia del sistema con las menores pérdidas del recurso hídrico. Se utilizaron goteros autocompensados para igualar presiones y realizar un riego uniforme. El sistema de riego constó de dos ramales que abastecía a 7 módulos cada uno. Por cada saco de los tres que conforman el módulo, se colocó una doble manguera de riego con 6 goteros/saco. De acuerdo a las limitantes climáticas de la región se planteó un riego diferencial según estaciones críticas. Durante invierno, primavera y otoño, se regó semanalmente durante 15 min con una lámina media de 7,5 litros. La frecuencia de riego se duplicó a dos riegos del mismo tipo por semana en la estación de verano, la cual es muy demandante para las plantas debido a las altas temperaturas diarias y mínima humedad relativa. En la Figura 8 se muestra la disposición del ensayo y la distribución del sistema de riego-.

Los módulos con cada especie vegetal se apoyaron sobre una capa de poliestireno expandido de baja densidad de 5 cm de espesor cubierto con un polietileno negro de 100µm, para evitar enraizamiento en el suelo y aislar la humedad y temperatura del sistema. Estos módulos contaron con un desnivel mínimo que permitiera que el agua drenada sea recogida por una canaleta aguas abajo y colectada para cada especie luego de cada riego.



Figura 8: Ensayo experimental y sistema de riego.

Inicialmente se implantaron 9 plantas por m^2 en cada módulo (de la misma especie y provenientes de envases de tamaño estándar denominados n° 12), lo que permitió evaluar el poder tapizante de cada una en forma comparativa como se explicará en el apartado C.2. La especie *Cynodon dactylon* se implantó mediante “tepes” o “alfombra” del tamaño de la superficie de cada saco, debido a que es la forma tradicional y disponible de multiplicación de esta especie.

C. MEDICIONES BIOLÓGICAS

C.1. COBERTURA VEGETAL

La cobertura vegetal representa un indicador de crecimiento y adaptación de las plantas a las condiciones ambientales y, en particular, tiene un efecto indirecto en el balance energético de las cubiertas vegetadas y en el consumo energético de la edificación (Yaghoobian & Srebric, 2015). El concepto de cobertura, en este caso, describe los elementos, que se distribuyen sobre un determinado territorio (López Granados et al., 2002). Con el fin de cuantificar y contrastar las variaciones temporales de la cobertura vegetal sin eliminar la parte aérea de las mismas, se eligió un método no destructivo consistente en la toma de al final de cada estación del año, imágenes fotográficas de cada uno de los módulos con las distintas especies, empleando con una cámara fotográfica digital marca Samsung de 12 mp de resolución.

Dichas imágenes se procesaron con el software de tratamiento de imágenes free-ware MultiSpec© (2011). Esta herramienta permite procesar y analizar imágenes de tipo multispectral e hiper-espectral. El programa incluye varios algoritmos para calcular áreas, como son los de aspectos básicos (realce de contraste) y el análisis de componentes principales. En el programa se crearon 3 tipos de clases principales a diferenciar: planta, geotextil y sustrato, cuando fue necesario se incorporaron clases adicionales, como la de “flores” que luego a modo de cuantificación se adicionó a la categoría de plantas, debido a los colores diferenciales. Luego se seleccionaron por tipo de clase un campo de seis píxeles con al menos diez repeticiones por clase, con esta información el programa calcula

mediante el método estadístico seleccionado, el porcentaje existente de cada clase asignada en la imagen.

Estos porcentajes permiten conocer cuánta superficie cubre la planta del área total en las imágenes analizadas, y poder así comparar su variación temporal-estacional. En EL Anexo-I de Respuesta biológica, a modo de ejemplo, se presenta la salida del software con los porcentajes de cobertura para la especie *Aptenia cordifolia* correspondientes a la cobertura de la estación de verano 2014-2015. La imagen “bruta” y la imagen procesada se pueden observar en la Figura 9:

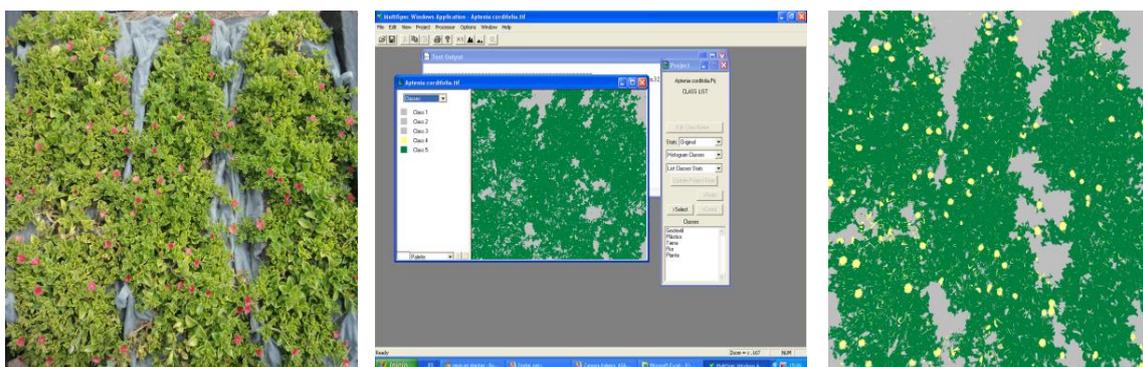


Figura 9: Análisis de fotografías con MultiSpec© para cálculo de porcentaje de cobertura.

C.2. CONDUCTANCIA ESTOMÁTICA Y TEMPERATURA DE HOJA

La conductancia estomática expresa cuán abiertos están los estomas en la planta -pequeños poros de la epidermis de las hojas donde ocurre el intercambio gaseoso para fotosíntesis y respiración-, lo cual se asocia a la genética de la especie, y a la respuesta de la planta en base a la temperatura del aire, a la radiación solar y a la disponibilidad del recurso hídrico en el sistema radical.

La adaptación de las plantas a la aridez local y a la baja disponibilidad de agua en el sustrato podría evaluarse a través de la capacidad de “manejar” la apertura estomática de cada especie de modo de realizar las funciones vitales como fotosíntesis y respiración, pero con una apertura eficiente de los estomas que no facilite una transpiración extrema que cause estrés hídrico. Además, la cuantificación de la conductancia estomática puede indicar cuánto se facilitan los procesos de fijación de CO₂ y la liberación de O₂ y agua, con los beneficios que esto implica al ambiente.

La conductancia estomática y la temperatura de hoja fue cuantificada mediante Porómetro marca Decagon Devices modelo SC-1 (Figura 10) en hojas de plantas totalmente expuestas durante horas del mediodía -en el rango horario de 11:00 hs a 14:00 hs-. Estas mediciones se repitieron durante al menos 3 veces en días de verano durante 3 años consecutivos (2016, 2017, 2018). Las mediciones se realizaron a partir del año 2016 para obtener datos certeros debido a que las plantas estaban totalmente establecidas y adaptadas al sistema. Las mediciones se realizaron previamente y posterior a la aplicación del riego planificado. Los días de medición seleccionados, se presentaron soleados y despejados. Para efectuar la medición de cada especie vegetal, se eligieron cuatro plantas y de cada una, dos hojas al azar y totalmente expuestas.



Figura 10: Porómetro Decagon Devices modelo SC-1.

C.3. CONSUMO HÍDRICO

El riego de las cubiertas vegetadas y otras infraestructuras verdes urbanas merecen un tratamiento diferencial, especialmente en el caso de regiones semiáridas donde el recurso hídrico es escaso, limitante y prioritario para el consumo humano. Comprometer el destino de dicho recurso al riego de estas estrategias de enverdecimiento de la ciudad, implica un uso racional, eficiente y controlado del mismo.

Por lo cual irrigar las cubiertas vegetadas es beneficioso ya que mejora la supervivencia de la planta y colabora con el control de la temperatura. La literatura internacional sobre sistemas de riego en cubiertas vegetadas es aún escasa y sugiere en general, para un riego más sostenible que el agua pueda conservarse adaptando los requisitos de riego (es decir, centrándose en la vegetación o los materiales), utilizando fuentes de riego alternativas (por ejemplo, aguas grises y recolección de agua de lluvia) o controlando y monitoreando los regímenes de riego. Existe interés internacional en las estrategias de riego deficitario, las cuales proponen especificaciones de riego para cubiertas vegetadas en diferentes climas (Van Mechelen et al., 2015).

El riego es esencial durante el establecimiento y etapa inicial de crecimiento en todos los tipos de cubiertas vegetadas (extensivo o intensivo) y en todos los climas. En particular, el riego es necesario e imprescindible en climas áridos o semiáridos. Si se promueve la conciencia pública sobre el consumo sostenible de agua y si las cubiertas vegetadas se diseñan cuidadosamente, las prácticas de riego pueden ser sostenibles a largo plazo y contribuir a un uso racional del recurso.

En la literatura internacional se han propuesto diferentes estrategias de conservación del agua que permiten el riego sostenible de áreas verdes (Chang et al., 2011). Estas estrategias se pueden categorizar en (1) adaptación de los requisitos de riego; (2) fuentes alternativas de riego y (3) control y monitoreo de los regímenes de riego. Todas las estrategias se pueden implementar de forma separada o simultánea, dependiendo de las consideraciones del diseño y del análisis económico. En primer lugar, el agua se puede conservar apuntando a la vegetación. Las cubiertas vegetadas extensivas están diseñadas principalmente con plantas suculentas de bajo consumo hídrico, como las del género *Sedum* (Carter y Keeler, 2008). Estos también pueden actuar como “plantas nodriza” para otras plantas menos tolerantes a la sequía, que les facilitan su establecimiento a través de la reducción de la temperatura del sustrato y por ello, de la tasa de evaporación (Butler y Orians, 2011).

Otra estrategia para adaptar el requisito de riego es mediante el diseño óptimo de materiales de cubierta vegetada, por ejemplo, mediante el desarrollo de sustratos con mayor capacidad de contener y conservar agua. La adición de suelo de textura franco-arenoso y el uso de suelos enmendados (es decir, mezcla de grava roja, vermiculita y compost de corteza), sustratos basados en perlita, láminas de espuma y fibra de vidrio; pueden mejorar la capacidad de contener agua del sistema de cubierta vegetada (Sutton et al., 2012; Williams et al., 2010).

La lámina de riego se puede minimizar a través del monitoreo y control de los regímenes de riego (Sutton et al., 2012; Guo et al., 2014). Los factores meteorológicos, principalmente la humedad relativa y el número de horas de sol son variables que condicionan el consumo de agua (Feng et al., 2012).

Los requerimientos de agua podrían calcularse utilizando información de evapotranspiración y precipitación (Bean & Pitt, 2012; Feng et al., 2012; Stovin et al., 2013), o estudiando la humedad del sustrato con sensores (Jim & Peng, 2012a, segundo). Dependiendo del clima local, a menudo es posible utilizar el riego solo durante el establecimiento y durante una sequía prolongada (Sutton et al., 2012). De lo contrario, la irrigación debe activarse cuando la humedad del sustrato cae por debajo de un nivel específico, como el punto de tensión (transición entre agua disponible en los poros más grandes del sustrato y agua disponible en los poros pequeños; Jim & Peng, 2012b).

Si bien la zona de estudio es árida con precipitaciones bajas, los científicos advierten que en 70 años las provincias de Mendoza y San Juan podrían llegar a tener el doble de lluvias que en la actualidad y un descenso de la precipitación en la Cordillera. Los veranos van a ser más lluviosos en las zonas llanas de la región. Actualmente la precipitación anual es en promedio de 200 mm, pero los modelos de circulación apuntan a que en el 2070 el promedio de precipitaciones ascenderá a los 300-400 mm (Villalba, 2006). Lo descripto y en un contexto de aprovechamiento del recurso hídrico, como las precipitaciones por lluvia para descontarlas eficientemente de la lámina de riego, nos indican la necesidad imperante de cuantificar el agua precipitada y la cantidad aprovechada por las plantas y el sustrato.

Para lograr este objetivo se midió la precipitación con pluviómetro en el ensayo experimental y el agua de drenaje por cada módulo experimental de especie vegetal luego de la lluvia, al igual que como se explicó para en la metodología para el sistema de riego. Se utilizaron 4 eventos para ajustar el sistema y luego se procesaron 12 eventos más para conocer el porcentaje de aprovechamiento del recurso. El porcentaje representa en términos medios, cuánto del agua se consume respecto a los milímetros de lluvia caídos.

$$\text{Porcentaje de agua de lluvia consumida (\%)} = \frac{\text{Agua consumida}}{\text{Registro en pluviómetro}} * 100$$

El agua precipitada debe complementarse con un sistema de riego de máxima eficiencia para el buen uso del recurso, satisfaciendo las necesidades de los cultivos. La tecnificación del riego con sistemas localizados, permiten la aplicación de caudales controlados, asegurando una relación más ajustada entre la lámina de riego y las necesidades hídricas de los cultivos. Dichos sistemas generan un bulbo húmedo -lo más

deseable en torno a la zona radical del cultivo- que constituye la reserva de agua aprovechable por la planta.

Puede afirmarse que, si bien la agricultura de riego de los oasis productivos de la provincia de Mendoza está en constante avance (desarrollo y aplicación de nuevas tecnologías), su sustentabilidad estará en relación directa con el uso eficiente del recurso hídrico. En este contexto el manejo de cualquier método de riego adecuado a las condiciones de clima, suelo y cultivo de la zona (Morábito et al., 2007; Fontela et al., 2009) es una herramienta que permite el máximo aprovechamiento de su eficiencia potencial. En el caso del riego localizado (goteo), es importante asegurar una adecuada operación y mantenimiento de los sistemas y un seguimiento de la salinidad - sodicidad del suelo. A nivel regional, los sistemas de riego por goteo alcanzan eficiencias superiores al 85%, siempre que tengan un manejo adecuado (Burt et al., 1997; Antúnez et al., 2010).

En una zona como el AMM, donde la aridez local no permite el cultivo de plantas sin riego y donde el recurso hídrico escasea, esta variable debe medirse para caracterizar a las especies y luego fomentar el uso de las de menor consumo. Para llevar a cabo esta tarea se midió con pluviómetro el agua de precipitaciones y se registró en una planilla. El aporte de agua de cada riego fue medido con un hidrómetro (Figura 11). El agua de drenaje de cada módulo se colectó en recipientes, considerando el tiempo de drenaje transcurrido luego de 3 horas de realizado un riego. El agua drenada se cuantificó a través de probetas graduadas, lo que permitió el análisis del consumo de agua de cada especie por unidad de superficie (m^2). Esto último se logró, descontado del agua de riego, el agua de drenaje, lo que por diferencia resulta como agua de consumo por especie y por m^2 . En cada riego, además, se midió la presión del sistema.

$$\begin{aligned} \text{Agua consumida por } \frac{\text{especie}}{m^2} \\ = \text{Cantidad de agua aportada por el sistema de riego} \\ - \text{Cantidad de agua drenada luego de un riego} \end{aligned}$$

En el año 2014 se inició con una frecuencia de riego de 2 veces a la semana para asegurar el establecimiento de las plantas. Luego de esta adaptación, que duró aproximadamente dos meses, la frecuencia de riego se redujo a una vez a la semana, con la cuota mínima establecida. Esta reducción en la frecuencia del riego se continuó durante el año 2015, y en ocasiones no se regó debido a las abundantes precipitaciones registradas, superiores a las ocurridas durante el año 2014 y su distribución en mayor número de días con eventos que dejaban saturado el sustrato. En el año 2016 con las plantas totalmente establecidas, adaptadas al sistema, y con mayor cobertura vegetal, fue necesario nuevamente aumentar la cuota de riego para garantizar el crecimiento y su sobrevivencia.



Figura 11: A la izquierda, hidrómetro para cuantificación de agua de riego utilizada. A la derecha pluviómetro para medición de precipitaciones.

C.4. PESAJE DE CUBIERTAS VEGETADAS

C.4.1. MÓDULOS DE CUBIERTA VEGETADA

El peso de las cubiertas vegetadas es un indicador de crecimiento de las plantas y también de cuál es el aporte al peso de la cubierta, es decir, cómo debería ser el cálculo y diseño estructural de un edificio para que su capacidad portante permita la aplicación de estos sistemas, o bien, en edificios ya existentes si soportarían el peso de esta tecnología en rehabilitaciones de la cubierta.

El peso de los sacos que contienen el sustrato más las plantas y el sistema de riego, se realizó con báscula al inicio del ensayo y al final del mismo, de modo que describa el peso aportado por el crecimiento de las plantas en el sistema de cubierta vegetada, y el aporte gravimétrico total que generaría a un techo a la capacidad portante de un edificio. Debido a esto se evaluó el aumento de peso que aporta cada especie desde la implantación inicial y el peso final obtenido (Figura 12). Su aumento o diferencia se define como:

$$\text{Diferencia de peso} = \text{Peso final} - \text{Peso inicial}.$$



Figura 12: Pesaje en báscula de sacos de cubierta vegetada.

C.4.2. CRECIMIENTO DE PLANTAS Y SU RELACIÓN VÁSTAGO-RAÍZ

El conocimiento de la dinámica del crecimiento de las plantas y su relación vástago-raíz puede dar una idea de la potencialidad del establecimiento de las mismos en ambientes áridos, donde prevalecen factores de estrés como sequías prolongadas, vientos con efectos abrasivos, altas temperaturas e insolación (Dalmasso et al., 1994). Debido a lo mencionado esta metodología de análisis se ha utilizado para especies arbustivas que han sobrevivido hasta el final de un cultivo, ya que para especies tapizantes o rastreras debido a su hábito de crecimiento el vástago siempre tiene mayor crecimiento que la raíz sometida a confinamiento.

Al final del ensayo (marzo 2018) todas las plantas arbustivas que sobrevivieron se procesaron de modo de tomar el peso fresco con balanza electrónica de 5 gramos de precisión y el peso seco según tratamiento, de la parte aérea y la parte radical (Figura 13). Esto se realizó en estufa a 60°C durante una semana con controles de peso cada 48 hs. y hasta obtener peso constante. También se calculó la relación de peso vástago/raíz.



Figura 13: Pesaje en fresco en balanza electrónica de *Hyalis argentea* "olivillo". a- corte de planta, b-toma de peso fresco del vástago; c- toma de peso fresco de las raíces; d-peso seco de las raíces.

Resultados de investigación de respuesta biológica de cubiertas vegetadas

A. COBERTURA VEGETAL

La cobertura vegetal en su máxima expresión vegetativa como una de las principales características buscadas en cubiertas vegetadas, muestra el siguiente comportamiento para las especies evaluadas.

La evolución estacional de la cobertura para cada especie desde el verano 2013-2014 -implantación- hasta el verano 2016-2017, se muestra en la Figura 14. Se observa que las especies *Lampranthus multiradiatus*, *Sedum lineare*, *Aptenia cordifolia*, *Cynodon dactylon*, *Zephyranthes candida*, *Hyalis argentea*, *Nassella tenuissima* y *Aristida purpurea* han demostrado una tendencia al aumento de su cobertura vegetal.

No obstante, las condiciones imperantes de la última estación estival con alta radiación y temperatura, y baja humedad relativa y precipitaciones, causó que varias especies disminuyeran su cobertura temporalmente; influenciado también por el confinamiento de raíces y la limitada humedad del sustrato. *Sedum spectabile* y *Zephyranthes candida*, han tenido un aumento inicial de cobertura con oscilaciones en algunos periodos de acuerdo al comportamiento estacional de cada especie y sus periodos de receso vegetativo - invierno para la primera y verano para la segunda-. *Thymus vulgaris* ha tenido un periodo de activo crecimiento durante el primer año de cultivo, pero a partir del verano siguiente su cobertura disminuyó abruptamente, por debajo del 10%, a pesar de su carácter de perenne. *Hymenoxys acaulis* y *Verbena rigida* evidenciaron baja adaptabilidad al sistema ya que sus máximos estacionales de cobertura oscilaron entre 10 y 20%.

Por estos motivos y dado que en el año 2015 presentaron mínima cobertura y alta mortandad de plantas, *Thymus vulgaris*, *Hymenoxys acaulis* y *Verbena rigida* fueron desestimadas de los ensayos experimentales.

Al considerar las dos últimas estaciones evaluadas, se observa que *Sedum lineare*, *Aptenia cordifolia*, *Cynodon dactylon*, *Zephyranthes candida*, *Hyalis argentea*, *Nassella tenuissima* y *Aristida purpurea* son las especies que han presentado cobertura mayor al 50%, lo que indica su potencial de uso para cubiertas vegetadas. En particular, las especies de mejor adaptación en términos de cobertura vegetal fueron *Aptenia cordifolia* (87.9 %), *Cynodon dactylon* (89.5 %), *Hyalis argentea* (85.6 %) y *Nassella tenuissima* (72.3 %).

En función del análisis de las estaciones extremas para la región de estudio, se observa que en términos medios para los tres veranos las especies que mostraron mayor cobertura vegetal resultaron ser cinco especies (*Aptenia cordifolia* 87%, *Cynodon dactylon* 86%, *Hyalis argentea* 85%, *Nassella tenuissima* 70% y *Sedum spectabile* 70%). En cambio,

para el invierno y atendiendo a la condición caducifolia de algunas especies, las que mejor se comportaron fueron: *Cynodon dactylon* 69% y *Nassella tenuissima* 65%. *Cynodon dactylon* mantiene una alta cobertura en términos medios en ambas estaciones extremas, pero en la estación de invierno su parte aérea se encuentra en estado de receso (deshidratada y con síntomas de amarillamiento).

En las estaciones intermedias, en particular en otoño, *Cynodon dactylon* presenta la mayor cobertura media de 87%, lo cual se debe a la disminución de las temperaturas y la ocasión de precipitaciones en la región en esta época del año, que en conjunto favorecen a esta especie en las estaciones de otoño. Las demás especies mantienen sus coberturas por debajo del 70% y las especies *Aptenia cordifolia*, *Hyalis argentea*, *Nassella tenuissima* y *Aristida purpurea* mantienen coberturas vegetales que se encuentran entre el 65 y el 70%. En la estación de primavera las especies que presentan mejor respuesta al inicio de la estación de crecimiento, estimulada por mayores temperaturas, son *Nassella tenuissima*, *Hyalis argentea*, *Cynodon dactylon*, *Aptenia cordifolia*, *Sedum spectabile*, *Aristida purpurea* con coberturas que van del 60 al 75%. De este último grupo se destacan *Nassella tenuissima* y *Hyalis argentea* con las mayores coberturas media para estación, 75% para la primera y 68% para la segunda.

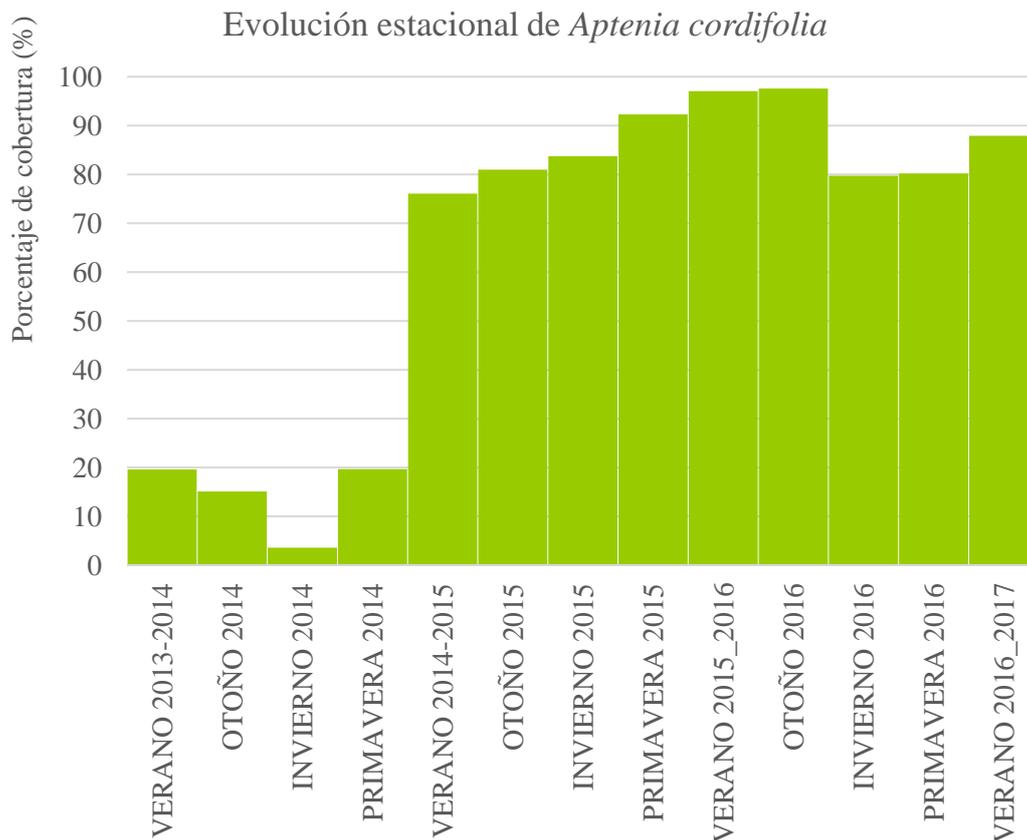
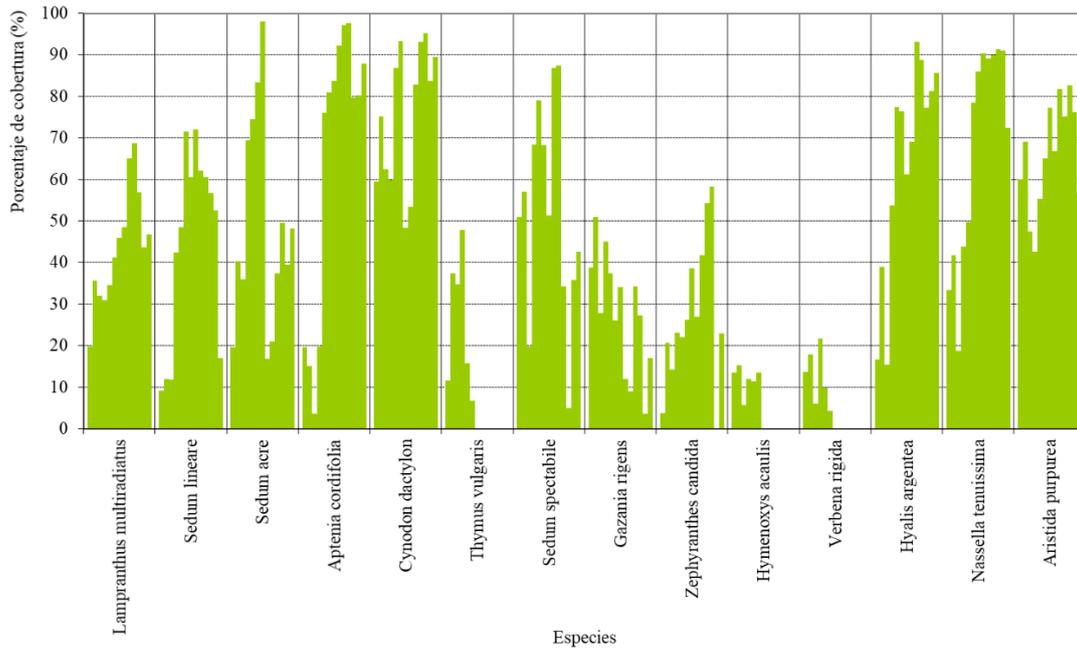


Figura 14: Porcentaje de cobertura vegetal por especie y por estación desde el verano 2013-2014 hasta el verano 2016-2017. Cada barra del gráfico representa el porcentaje de cobertura para una estación del año por especie, como se puede observar en la ampliación para la especie *Aptenia cordifolia*.

B. CONDUCTANCIA ESTOMÁTICA

Los valores medidos de conductancia estomática expresan cuán abiertos están los estomas en la planta. En la Figura 15 se muestran los valores medios de las repeticiones para las

mediciones previas y posteriores al riego, correspondientes a cada especie en los años 2016, 2017 y 2018.

Éstos demuestran, como se puede observar para el año 2016 en la Figura 15, que la especie que más responde al riego es *Sedum lineare* ($\Delta_{CE}=185$ mmol/m².s), ya que se observa una diferencia significativa entre la apertura de estomas antes y después del riego, además de una mayor apertura de estomas aún previo al riego en comparación con todas las demás especies evaluadas. La especie *Aptenia cordifolia* tiene un comportamiento similar al descrito para *Sedum lineare*, con la diferencia que su conductancia estomática previa al riego es menor y se encuentra en el rango de la mayoría de las especies (54.0 mmol/m².s para *Aptenia cordifolia*). *Gazania rigens* (CE PrevioR=11.8 mmol/m².s, CE PosteriorR=35.4 mmol/m².s) es la tercer especie que presenta diferencia significativa en cuanto a la diferencia de conductancia estomática entre ambos momentos, previo y posterior al riego, pero entre valores muy próximos. Las siete especies restantes, *Aristida purpurea*, *Cynodon dactylon*, *Hyalis argentea*, *Lampranthus multiradiatus*, *Nassella tenuissima*, *Sedum spectabile* y *Zephyrantes candida* no presentan diferencias significativas entre ambos momentos y sus valores se encuentran en rangos bajos (17.3 a 47.4 mmol/m².s). Se destaca también *Sedum acre*, que presenta valores muy cercanos para los momentos previos y posteriores al riego, diferenciándose del resto de las especies con conductancias mayores (CE PrevioR=148.9 mmol/m².s, CE PosteriorR=173.5 mmol/m².s).

Una mayor apertura estomática posterior al riego, permitiría mayor tasa transpiratoria y pérdidas de agua, pero más disponibilidad de CO₂ para asimilar a través de la fotosíntesis e incrementar la masa vegetal.

Para el año 2017 se observa que las especies con diferencia significativa son *Cynodon dactylon* y *Hyalis argentea*, además, ésta última también presenta diferencias significativas entre los momentos previo y posterior al riego para el año 2018. *Cynodon dactylon* es una especie que para mantener viva la parte aérea y no evidenciar síntomas de amarillamiento foliar necesita riegos frecuentes, pero también presenta la característica de poseer órganos de reserva que facilitan el rebrote luego de lluvias, más aún si los días no presentan altas temperaturas. En el contexto del año 2017, la especie se encontraba más activa y respondió mejor con la apertura estomática a los momentos previo y posterior al riego.

Hyalis argentea es una especie nativa que por esta condición presenta una marcada adaptación a las condiciones ambientales locales, pero por otro lado no vegeta comúnmente en sustratos ricos en materia orgánica. Esto podría indicar que con la mineralización del sustrato desde la implantación hasta el año 2017 y la adaptación de esta especie al sistema, adquirió aptitudes de respuesta al microclima imperante en las cubiertas vegetadas durante el período evaluado, lo que se tradujo en un manejo más eficiente de la apertura estomática y por ende de la conductancia, para ser más conservativa en términos de administración del recurso hídrico.

Año



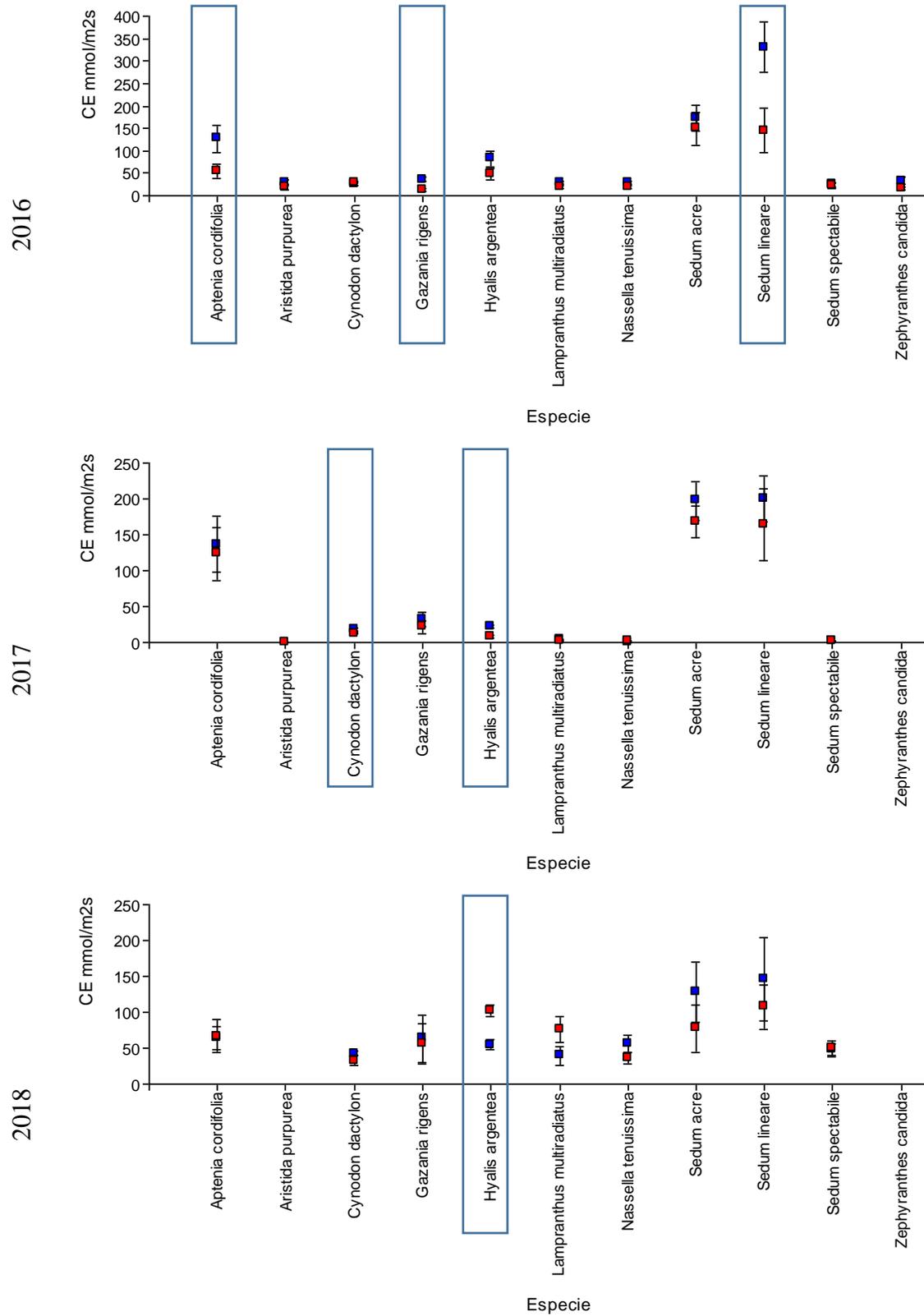


Figura 15: Conductancia estomática en mmol/m².seg antes y después del riego para los años 2016, 2017 y 2018. Los recuadros indican diferencia significativa en la conductancia estomática antes y después del riego por especie (Test:Tukey; Alfa: 0,05). Las tablas de ANAVA se encuentran en el Anexo de Respuesta biológica.

C. TEMPERATURA DE HOJA

Esta variable es un indicador de la temperatura de la planta. En la Figura 16 se puede observar la temperatura de hoja medida en el rango del mediodía solar durante los años 2016, 2017 y 2018. Se puede observar que para el año 2016, a excepción de tres especies -*Aristida purpurea*, *Gazania rigens* y *Sedum acre*- las plantas ensayadas demuestran diferencias significativas respecto a la temperatura de hoja entre los momentos previo y posterior al riego. Estas tres especies presentan valores muy cercanos de temperatura de hoja en ambos momentos por lo cual se puede inferir que no responderían al aporte de agua. Al analizar las especies que responden positivamente al riego y presentan diferencias significativas en este indicador entre ambos momentos se puede interpretar que se activa su metabolismo, el cual se podría haber encontrado ralentizado debido a condiciones de riego deficitario.

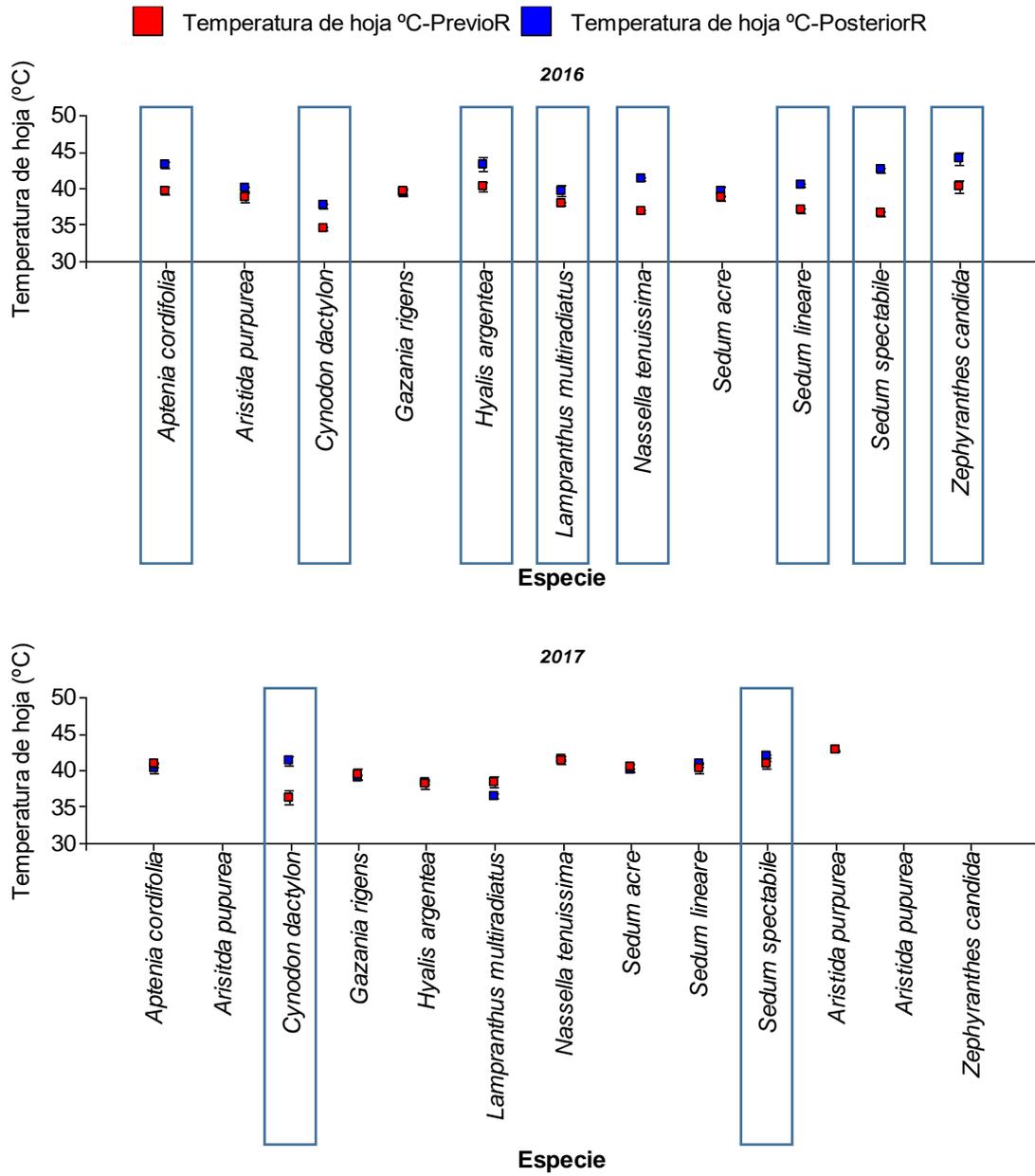
Se puede observar para el año 2016 que la menor temperatura de hoja medida previo a un riego en condiciones de estrés la presenta la especie *Cynodon dactylon* (34.5 °C) pero también presenta el menor valor luego del riego (37.6 °C), lo cual podría deberse a su estado de amarillamiento (actividad metabólica reducida) en la estación de verano. Las mayores diferencias entre ambos momentos, expresadas en diferencias entre valores medios por momentos, las presentan las especies *Aptenia cordifolia* (3.0 °C), *Cynodon dactylon* (3.5 °C), *Hyalis argentea* (2.9 °C), *Nassella tenuissima* (4.4 °C), *Sedum lineare* (3.4 °C), *Sedum spectabile* (6.0 °C) y *Zephyranthes candida* (3.9 °C).

Para el año 2017 sólo presentan diferencias significativas entre ambos momentos con respecto al estado hídrico en la temperatura de hoja, dos especies, *Cynodon dactylon* (5.0 °C) y *Sedum spectabile* (1.2 °C), y sólo la primera especie no presenta valores cercanos entre ambos momentos.

Para el tercer año, 2018, se observa que son 5 las especies que presentan diferencias significativas en cuanto a la temperatura de hoja entre ambos momentos: *Aptenia cordifolia* (1.0 °C), *Lampranthus multiradiatus* (1.2 °C), *Sedum lineare* (0.9 °C), *Sedum acre* (2.4 °C) y *Sedum spectabile* (1.8 °C). Las especies que han presentado diferencia responden a la característica de ser plantas del tipo “carnosa”, “crasa” o “suculenta”, metabolismo originalmente adaptado a condiciones de zonas áridas donde la humedad es baja y la temperatura y la radiación son altas.

Esto último, evidencia que luego de 3 años de evaluación en el que las plantas están en condiciones restringidas de contenido de agua de sustrato -riegos mínimos-, estas plantas continúan con su metabolismo activo y adaptadas al sistema y al medio de cultivo.

Hyalis argentea y *Nassella tenuissima*, ambas especies nativas, muestran otra estrategia de adaptación a zonas áridas evitando captar la intensa radiación solar mediante el desarrollo de hojas finas y orientadas con dirección paralela a la incidencia de los rayos solares. Esto puede justificar que al final del ensayo experimental estas especies no presenten diferencias significativas en temperatura de hoja entre ambos momentos. No obstante, sí presentan los menores valores (PrevioR:40.71 °C y PosteriorR:40.48 °C para *Nassella tenuissima*; PrevioR:35.6 °C y PosteriorR:36.5 °C para *Hyalis argentea*) de temperatura en ambos momentos -previo y posterior al riego-.



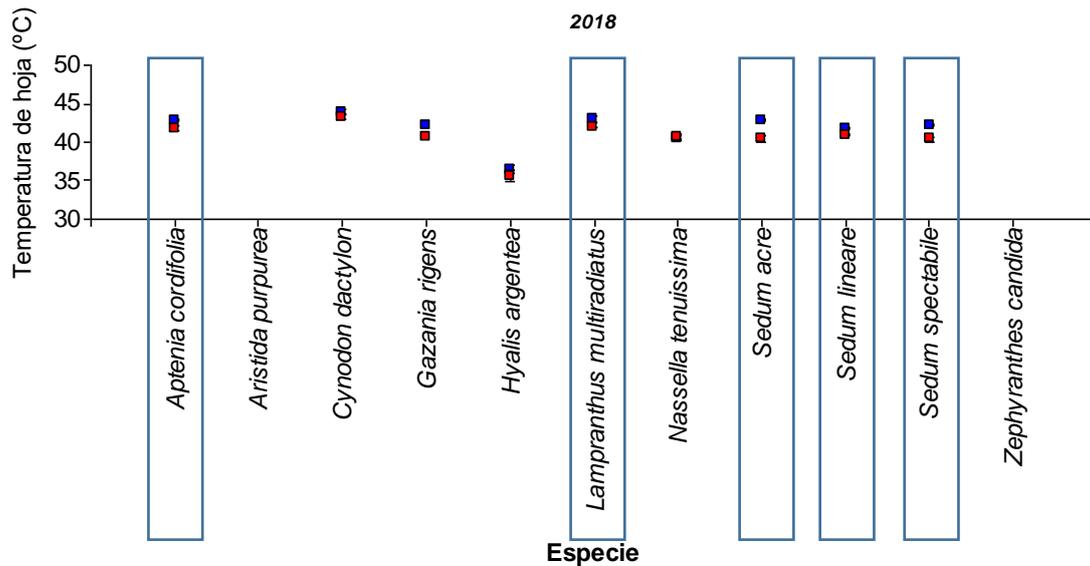


Figura 16: Temperatura de hoja antes y después del riego para los años 2016, 2017 y 2018. Los recuadros indican diferencia significativa en la temperatura de hoja antes y después del riego por especie (Test: Tukey; Alfa: 0,05). Las tablas de ANAVA se encuentran en el Anexo de Respuesta biológica.

D. CONSUMO HÍDRICO

Para el caso de estudio, el aporte de agua a los módulos experimentales provino principalmente del riego por goteo subsuperficial incorporado al sistema, considerando cuotas mínimas de riego y en forma complementario del aprovechamiento de las lluvias estacionales, cuya ocurrencia más frecuente es en la estación de mayor demanda hídrica (primavera-verano).

D.1. Aporte de agua por riego

Durante el período de ensayo se observa la aplicación de un riego homogéneo, con valores medios de lámina aplicada del orden de 7,5 litros por especie y por metro cuadrado, para cada evento de riego aplicado durante los tres años de experimentación (Figura 17).

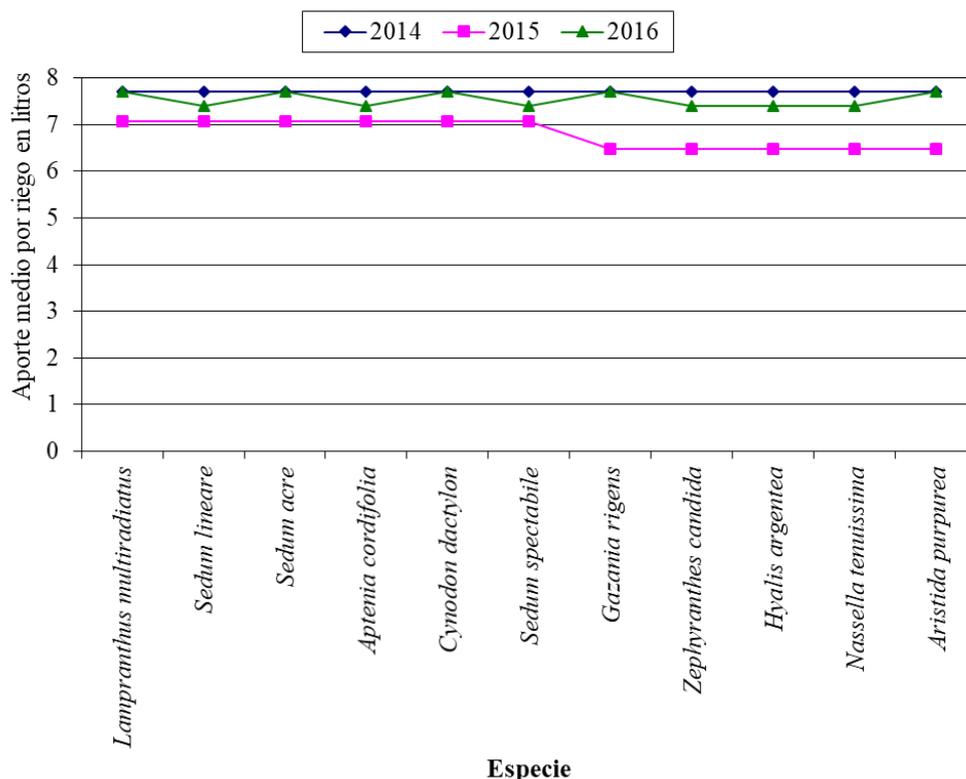


Figura 17: Aporte medio de agua por riego.

D.2. Consumo hídrico

La cuota de riego aplicada a las especies seleccionadas ha sido mínima, debido a la restricción y escasez del recurso hídrico de la zona donde se realiza el experimento. Debido a esta condición los módulos de 1 m² donde se encuentra cada especie no han presentado agua de drenaje verificable en cada uno de los riegos efectuados, debido a que el diseño inicial ha considerado un esquema de riego deficitario. Esto último, resulta fundamental para el uso racional del escaso recurso hídrico, pero dificulta que se presenten grandes diferencias de consumo hídrico entre especies, como probablemente hubiese sucedido si el riego excediera al consumo de las plantas y atendiera a responder a su capacidad de campo. De este modo, el agua de drenaje de cada módulo, posterior al riego, representa la eficiencia de uso de agua de la planta asociada al sistema planta-agua-suelo.

En la Figura 18 se observa cómo ha sido el consumo hídrico por año y por especie vegetal para los años 2014, 2015 y 2016, el cual es función del consumo de la planta y del ajuste inicial del sistema de riego. Al comienzo del ensayo y según su evolución temporal, se realizó el seguimiento fenológico de las plantas, el registro de su desarrollo vegetativo (cobertura vegetal) y monitoreo de crecimiento.

En el año 2014 y atendiendo a la reciente implantación del cultivo fue necesario aplicar una lámina de mayor volumen para garantizar su establecimiento y permanencia en el sistema. Además, en este año, sólo en el mes de febrero las precipitaciones superaron la media histórica por lo que fue un “año seco”. Sumado a ello, en la mayoría de los meses las precipitaciones ocurrieron en menos de 5 días al mes, lo cual no garantiza la frecuencia necesaria para mantener la humedad necesaria en el sustrato para satisfacer al cultivo. Los

consumos hídricos en este año oscilaron en un rango de 26.2 litros (Máx. 260.05 l, Mín. 233.86 l).

El año 2015 presentó precipitaciones que superaban ampliamente la media histórica durante cinco meses de temperaturas moderadas a altas, en los cuales el cultivo era más exigente en cuanto al recurso. Durante este período las precipitaciones ocurrieron en más de 5 días al mes, los que al distanciarse facilitó que el agua fuera más aprovechada por las plantas ya que se distribuyó con mayor uniformidad en el mes. Para el año 2015, los consumos hídricos oscilaron en un rango de 22.9 litros (Máx. 112.75 l, Mín. 89.85 l).

Para el 2016 se presenta un comportamiento similar al 2015, con precipitaciones abundantes en los periodos críticos de consumo para las plantas debido a la coincidencia con momentos de alta actividad metabólica por las mismas (por el período estival en el que se encontraban). Pero a diferencia del 2015, también se desplazaron algunas lluvias abundantes a la estación otoñal, lo que ocasionó que el recurso se aprovechara con menos eficiencia que en el año anterior. Los consumos hídricos en este año oscilaron en un rango de 22.3 litros (Máx. 319.92 l, Mín. 297.53 l).

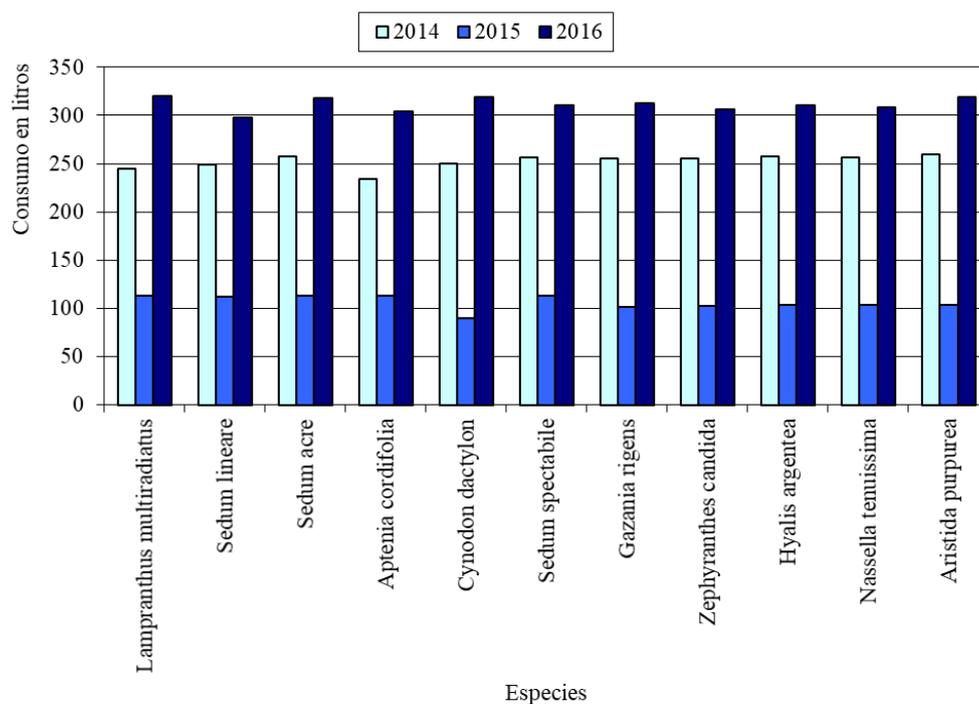


Figura 18: Consumo de agua en litros por especie y por año.

En la Figura 19 se muestra el consumo de agua promedio anual por especie, el cual representa el comportamiento esperado de cada una. Al analizar los valores medios anuales para las especies que se adaptaron al sistema, se observa que la especie más eficiente, es decir la de menor consumo hídrico, es *Aptenia cordifolia* con 217 l/año y la de mayor consumo es *Sedum acre* con 229 l/año. Para un consumo hídrico medio anual que oscila en un rango de 12 litros, las especies *Aptenia cordifolia*, *Sedum lineare*, *Cynodon dactylon* y *Zephyranthes candida* se encuentran en el tercio de menor consumo (217-221 l/año). *Nassella tenuissima*, *Gazania rigens* y *Hyalis argentea* se encuentran en un rango medio (221-225 l/año); y *Lampranthus multiradiatus*, *Sedum spectabile*, *Aristida purpurea* y *Sedum acre* son las especies de mayor consumo (225-229 l/año).

Aunque las diferencias de consumo no muestran variaciones impactantes en términos numéricos, es necesario considerar que refieren a una superficie de un metro cuadrado y que la implementación masiva de cubiertas vegetadas a escala urbana, podría significar grandes superficies de techos vegetados y en consecuencia adquieren relevancia los consumos diferenciales.

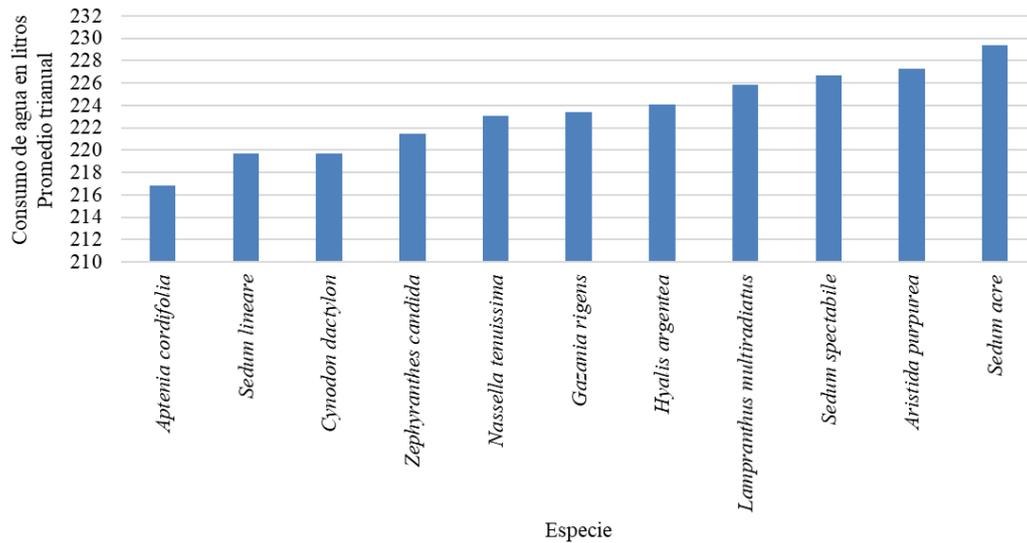


Figura 19: Consumo medio de agua por especie.

D.3. Aporte de agua por precipitaciones

El registro de las precipitaciones ocurridas desde la implantación del cultivo en el ensayo experimental (Dic 2013) y hasta su finalización (Dic 2017) se presenta mes a mes en la Figura 20. Este registro, se analizó comparativamente con la precipitación normal o media histórica para el período 1983-2013, anterior al periodo del ensayo. Las precipitaciones ocurridas durante el desarrollo del ensayo (2014-2017) han superado la media histórica mensual para el período (1983-2013). Esto se puede observar con registros mayores a 40 mm de lluvia para los meses de Feb y Dic `14, Feb, Mar y Nov `15, Ene, Mar y May `16, Feb, Abr, Nov y Dic `18.

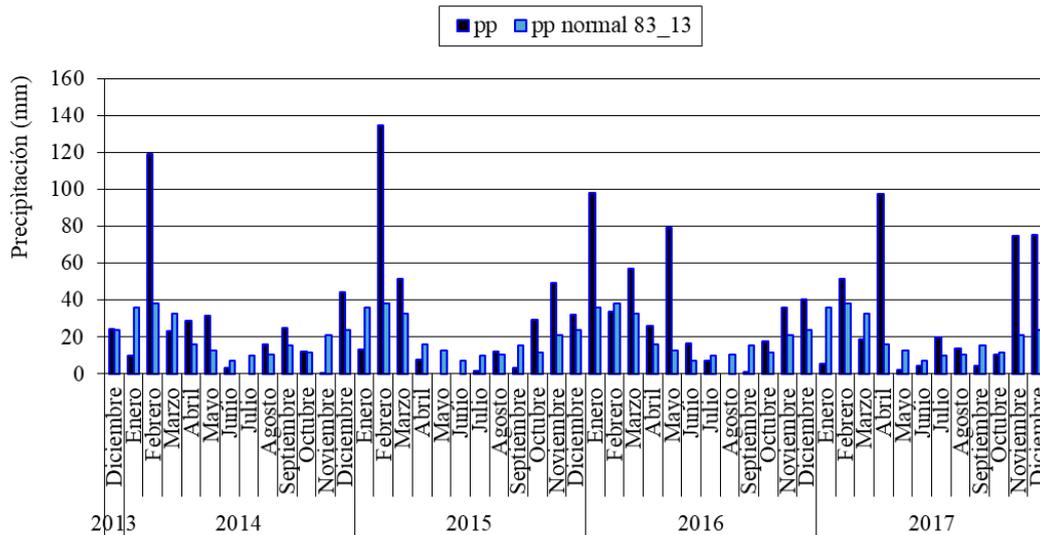


Figura 20: Precipitación mensual medida localmente 2014-2017 en comparación a la normal (serie 1983-2013).

En la Figura 21 se ve la distribución de las lluvias registradas durante el ensayo experimental, mensualmente y considerando la cantidad de días al mes donde ocurrió una precipitación. Se observa que salvo en tres meses (febrero y octubre 2015, y mayo 2016) en los que se registran 10 o más días con precipitaciones; en el resto de los meses del período evaluado, se presentan entre 5 y 10 días por mes con precipitaciones que en general son menores a 5 milímetros por evento (para el 67% de los meses del año según Morábito et al., 2002). Cabe destacar que se presentaron cuatro meses (junio 2014, mayo, junio y agosto 2015) en los que no hubo ocurrencia de precipitaciones.

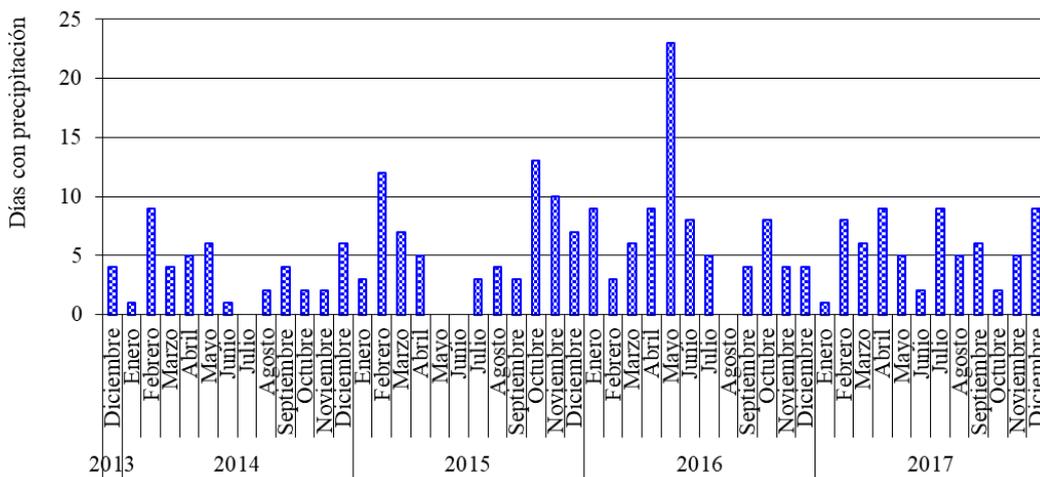


Figura 21: Días con precipitación por mes para los años 2014-2017.

Estos valores muestran la necesidad de realizar un riego complementario artificial con una lámina mínima establecida pero que asegure el crecimiento y la sobrevivencia de las plantas.

Es importante analizar cuánto de las precipitaciones por lluvias es captado por el sustrato y la canopia vegetal y es aprovechado por las plantas, es decir no se pierde por escorrentía o drenaje. Al observar la Figura 22 se observa que las especies con menor aprovechamiento del agua de lluvia son *Gazania rigens* y *Aristida purpurea*, que son las de mayor porcentaje de sustrato descubierto o menor cobertura vegetal (17% y 46%, respectivamente). En cambio, las especies restantes logran aprovechar más del 60% del

agua de lluvia, siendo *Nassella tenuissima* la especie que mejor aprovecha las precipitaciones con un porcentaje del 75%.

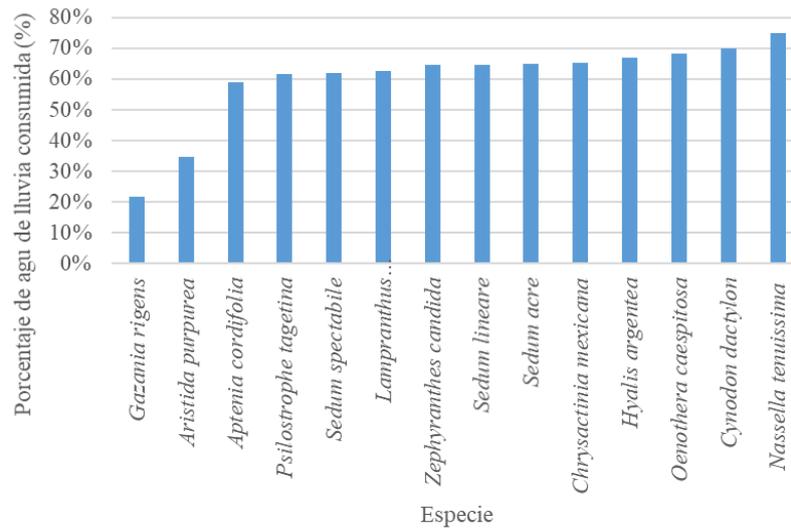


Figura 22: Consumo porcentual de agua de lluvia por especie.

E. PESAJE DE CUBIERTAS VEGETADAS

E.1. Módulos de cubierta vegetada

La capacidad portante de las cubiertas edilicias define un límite al peso que puede adicionar esta tecnología verde. La diferencia de peso o el aumento de peso desde la implantación del cultivo hasta su estado definitivo en la cubierta, explica el crecimiento de cada especie vegetal por metro cuadrado y el peso final nos dice cuánto es el aporte del sistema total integrado: sustrato-plantas-sistema de riego por metro cuadrado.

De acuerdo a la Figura 23, la especie *Sedum spectabile* es la única que se diferencia de forma significativa del resto con un aumento de peso mayor a todas las demás, con un valor de 45 kg/m^2 (probablemente debido a su condición de planta carnosa -crasulácea- que reserva agua en tallos y hojas como mecanismo de adaptación a la sequía). Las demás especies no superan los 30 kg/m^2 de aumento de peso. Del mismo modo, *Sedum spectabile* es también la especie de mayor peso final diferenciándose significativamente de las demás con un peso de 81 kg/m^2 . *Nassella tenuissima* y *Sedum lineare* (debido a su baja cobertura final de 17%) son las especies que se diferencian con el resto por presentar los menores peso finales por metro cuadrado, con valores próximos a los 55 kg/m^2 .

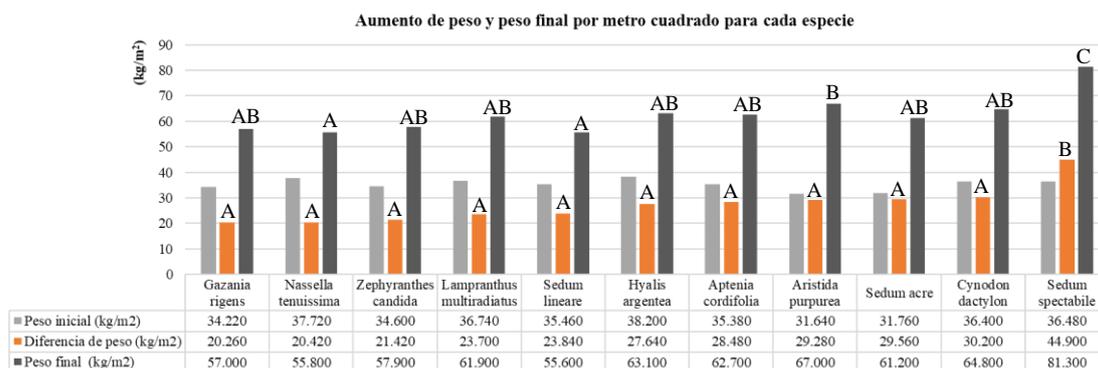


Figura 23: Aumento de peso y peso final en kilogramos por metro cuadrado por especie. Letras diferentes indican diferencia significativa en diferencia de peso y en peso final para cada especie (Test:Tukey; Alfa: 0,05). La tabla completa de datos se encuentra en el Anexo de Respuesta biológica.

E.2. Peso fresco, peso seco y relación vástago-raíz

Entre las especies de hábito de crecimiento arbustivo: *Hyalis argentea* (nativa), *Nassella tenuissima* (nativa) y *Sedum spectabile* (exótica) (Figura 24-Tabla 5); *Nassella* sp. es la especie que mostró una mayor longitud de vástago y menor longitud de raíz; *Hyalis* sp. es una especie intermedia en altura, pero con alturas más homogéneas entre plantas que *Nassella* sp., y con mayor longitud de raíces que la antes mencionada. Por lo cual, estas dos especies nativas aportan mayor altura de canopia sobre la cubierta vegetada lo que facilitaría el sombreado y la generación de una capa de aire aislante entre ellas. *Sedum* sp. en cambio, presenta la menor longitud de vástago y una longitud intermedia de raíz, debido probablemente a su característica de presentar raíces gemíferas.

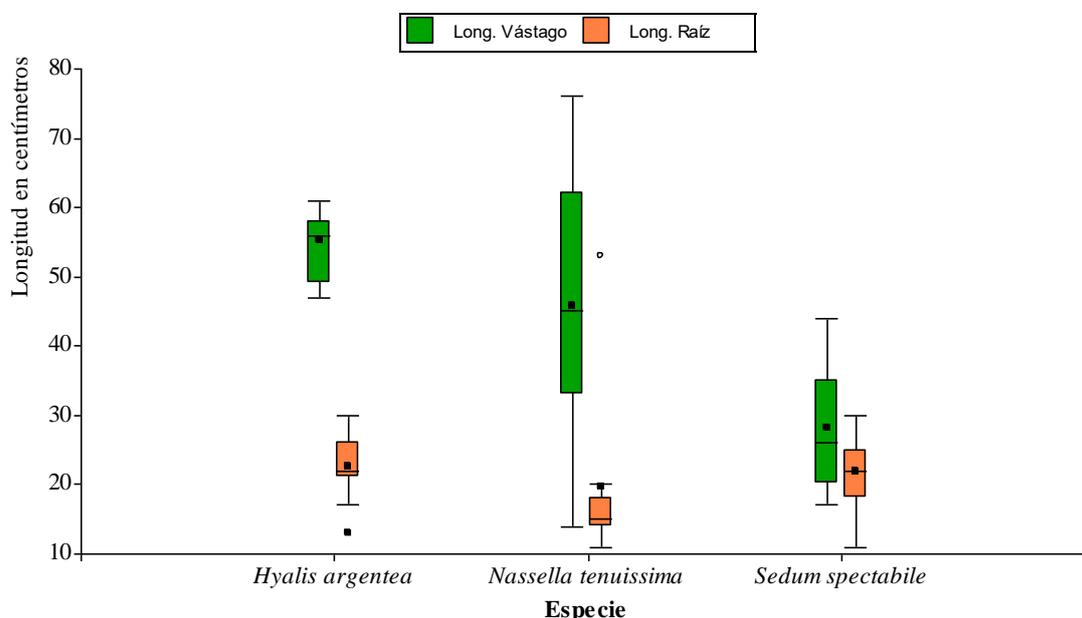


Figura 24: Longitud de vástago y de raíz para especies arbustivas.

Especie	Saco	Planta	Long. Vástago	Long. Raíz
<i>Hyalis argentea</i>	Saco 1	Planta 1	55	30
<i>Hyalis argentea</i>	Saco 1	Planta 2	56	13
<i>Hyalis argentea</i>	Saco 1	Planta 3	57	22
<i>Hyalis argentea</i>	Saco 2	Planta 1	54	17
<i>Hyalis argentea</i>	Saco 2	Planta 2	61	21
<i>Hyalis argentea</i>	Saco 2	Planta 3	60	28
<i>Hyalis argentea</i>	Saco 3	Planta 1	49	24
<i>Hyalis argentea</i>	Saco 3	Planta 2	47	26
<i>Hyalis argentea</i>	Saco 3	Planta 3	58	22
<i>Nassella tenuissima</i>	Saco 1	Planta 1	14	11
<i>Nassella tenuissima</i>	Saco 1	Planta 2	33	53
<i>Nassella tenuissima</i>	Saco 1	Planta 3	46	20
<i>Nassella tenuissima</i>	Saco 2	Planta 1	74	18
<i>Nassella tenuissima</i>	Saco 2	Planta 2	45	18
<i>Nassella tenuissima</i>	Saco 2	Planta 3	62	15
<i>Nassella tenuissima</i>	Saco 3	Planta 1	26	14
<i>Nassella tenuissima</i>	Saco 3	Planta 2	37	14
<i>Nassella tenuissima</i>	Saco 3	Planta 3	76	13
<i>Sedum spectabile</i>	Saco 1	Planta 1	26	11
<i>Sedum spectabile</i>	Saco 1	Planta 2	44	30
<i>Sedum spectabile</i>	Saco 1	Planta 3	35	21
<i>Sedum spectabile</i>	Saco 2	Planta 1	20	18
<i>Sedum spectabile</i>	Saco 2	Planta 2	22	16
<i>Sedum spectabile</i>	Saco 2	Planta 3	29	29
<i>Sedum spectabile</i>	Saco 3	Planta 1	17	25
<i>Sedum spectabile</i>	Saco 3	Planta 2	42	25
<i>Sedum spectabile</i>	Saco 3	Planta 3	18	22

Tabla 5: Longitud de vástago y de raíz para *Hyalis argentea*, *Nassella tenuissima* y *Sedum spectabile*.

En la Figura 25 se observa que la especie de mayor longitud de vástago, *Nassella tenuissima*, también es la de menor peso fresco total (vástago más raíces). *Sedum spectabile* es -menor longitud de vástago- la de mayor peso final. *Hyalis argentea* presenta valores intermedios de peso.

Las especies nativas presentan mayor concentración de peso en las raíces que en la parte aérea, debido probablemente a sus mecanismos de adaptación. Éstos se refieren a la emisión de una cantidad limitada de hojas orientadas de tal manera de recibir baja exposición directa a la radiación solar. Presentan también mecanismos de reserva subterránea y alta capacidad de exploración radical en busca de agua, que además les otorga mayores aptitudes de hacer frente a vientos moderados o fuertes debido a su anclaje profundo. Este efecto en plantas nativas es aún mayor para *Hyalis argentea* debido a que tiene raíces gemíferas, lo cual permite una mayor concentración de sólidos como se puede observar en la Figura 26, presentando un peso seco máximo en raíces, mayor al máximo del peso seco en vástago.

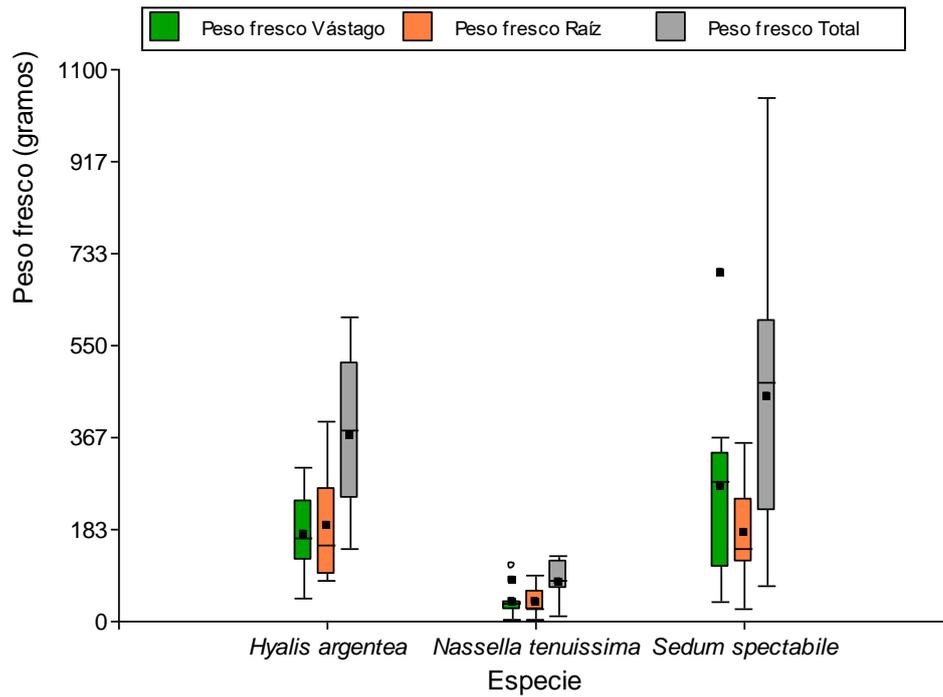


Figura 25: Peso fresco de vástago, raíz y total para especies arbustivas.

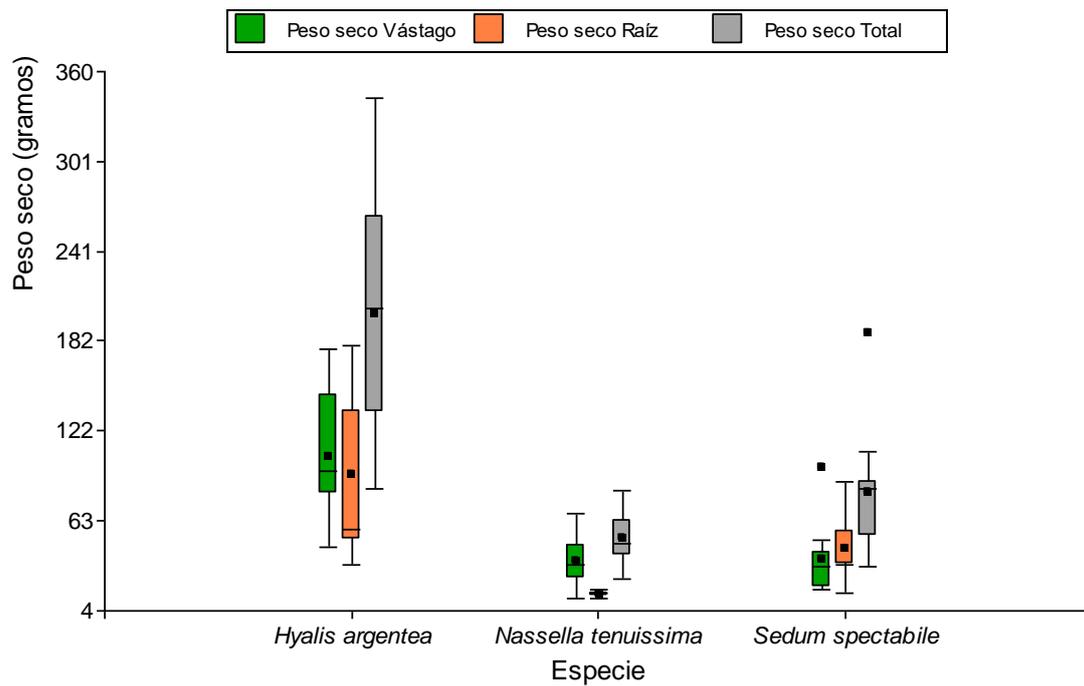


Figura 26: Peso seco de vástago, raíz y total para especies arbustivas.

Especie	Saco	Planta	(PFT) Peso Fresco Total	(A) Relación V/R PF	(PST) Peso Seco Total	(B) Relación V/R PS	Dif. V/R=A - B
<i>Hyalis argentea</i>	Saco 1	Planta 1	145	0.50	95.8	0.90	-0.40
<i>Hyalis argentea</i>	Saco 1	Planta 2	515	0.30	263.7	0.49	-0.19
<i>Hyalis argentea</i>	Saco 1	Planta 3	605	0.94	343.0	0.92	0.02

<i>Hyalis argentea</i>	Saco 2	Planta 1	320	1.39	134.6	1.52	-0.13
<i>Hyalis argentea</i>	Saco 2	Planta 2	560	1.15	312.3	1.31	-0.16
<i>Hyalis argentea</i>	Saco 2	Planta 3	380	1.60	203.1	2.57	-0.97
<i>Hyalis argentea</i>	Saco 3	Planta 1	245	1.43	143.8	2.02	-0.58
<i>Hyalis argentea</i>	Saco 3	Planta 2	425	0.93	213.7	0.92	0.01
<i>Hyalis argentea</i>	Saco 3	Planta 3	145	0.88	83.9	1.51	-0.63
<i>Nassella tenuissima</i>	Saco 1	Planta 1	10	1.00	24.6	0.98	0.02
<i>Nassella tenuissima</i>	Saco 1	Planta 2	65	1.33	39.9	1.61	-0.28
<i>Nassella tenuissima</i>	Saco 1	Planta 3	120	0.35	63.3	2.91	-2.55
<i>Nassella tenuissima</i>	Saco 2	Planta 1	130	5.50	82.5	4.55	0.95
<i>Nassella tenuissima</i>	Saco 2	Planta 2	65	1.40	41.5	1.42	-0.02
<i>Nassella tenuissima</i>	Saco 2	Planta 3	105	4.00	62.2	3.10	0.90
<i>Nassella tenuissima</i>	Saco 3	Planta 1	10	1.00	24.7	1.08	-0.08
<i>Nassella tenuissima</i>	Saco 3	Planta 2	80	0.33	47.5	2.65	-2.32
<i>Nassella tenuissima</i>	Saco 3	Planta 3	125	0.39	73.9	3.79	-3.40
<i>Sedum spectabile</i>	Saco 1	Planta 1	135	1.80	38.5	0.95	0.85
<i>Sedum spectabile</i>	Saco 1	Planta 2	475	2.31	84.0	1.50	0.81
<i>Sedum spectabile</i>	Saco 1	Planta 3	600	1.00	108.5	0.63	0.37
<i>Sedum spectabile</i>	Saco 2	Planta 1	70	1.60	32.9	1.10	0.50
<i>Sedum spectabile</i>	Saco 2	Planta 2	530	1.14	88.9	0.57	0.57
<i>Sedum spectabile</i>	Saco 2	Planta 3	615	1.55	88.1	0.64	0.91
<i>Sedum spectabile</i>	Saco 3	Planta 1	335	1.79	59.2	0.75	1.04
<i>Sedum spectabile</i>	Saco 3	Planta 2	1045	1.96	187.3	1.11	0.85
<i>Sedum spectabile</i>	Saco 3	Planta 3	220	0.91	52.3	0.53	0.38

Tabla 6: Peso fresco total, peso seco total y relación vástago-raíz. La tabla completa se encuentra en el Anexo de Respuesta biológica.

La relación vástago-raíz está regulada por un equilibrio entre la fotosíntesis y la cantidad de agua incorporada. Este equilibrio se altera en situaciones de déficit hídrico, produciéndose un crecimiento radical hacia zonas más húmedas debido a dos motivos: en primer lugar, la inhibición de la expansión foliar disminuye el gasto energético por parte del vástago, de forma que gran parte de los productos generados (fotoasimilados) se redistribuyen hacia las raíces donde favorecen su crecimiento. Este efecto es menos significativo en plantas que se encuentran en periodo reproductivo ya que, en ese caso, dirigen los fotoasimilados hacia los frutos, en mayor medida que hacia las raíces. Esto podría explicar que las plantas sean mucho más sensibles al déficit hídrico durante el periodo reproductivo. En segundo lugar, la disminución del crecimiento radical hacia zonas secas se debe a una pérdida en la turgencia de esas células, interrumpiendo su expansión y dirigiendo el crecimiento radical hacia zonas húmedas (Taiz y Zeiger, 2002).

Se observa diferencia significativa en la diferencia de relación vástago-raíz entre *Nassella tenuissima* y *Sedum spectabile* (Tabla 6). *Hyalis argentea* presenta un valor intermedio, sin diferenciarse significativamente de las otras dos especies (Figura 27). Esto se debe a que éste, es la especie que presenta el menor valor de relación V/R en peso fresco debido a su gran exploración radical. En cambio, en peso seco queda en segundo lugar, luego de *Sedum spectabile* debido al mayor contenido de humedad de esta especie. Esto último, evidencia la estrategia de esta especie crasa de acumular agua para adaptarse a condiciones de aridez. *Nassella tenuissima* presenta la menor diferencia de relación V/R

entre peso fresco y peso seco, ya que es la que contiene menor cantidad de humedad e incluso al secarse en estufa para peso seco a 60 °C su relación V/R aumenta debido a que se deshidratan más sus raíces que su vástago, lo cual aumenta la relación V/R de peso seco respecto a la de peso fresco. *Hyalis argentea* presenta un comportamiento similar a la diferencia de relación V/R de *Nassella* sp. pero su gran sistema radical impide que se diferencie significativamente de *Sedum spectabile* debido al cociente de la relación V/R en peso seco. *Sedum spectabile* presenta la mayor diferencia de relación V/R (única con valor positivo) debido a su significativamente mayor peso en fresco que en seco (por su acumulación de agua) y a su mayor tamaño de vástago comparado con sus raíces, relación que se conserva tanto en peso fresco como en peso seco.

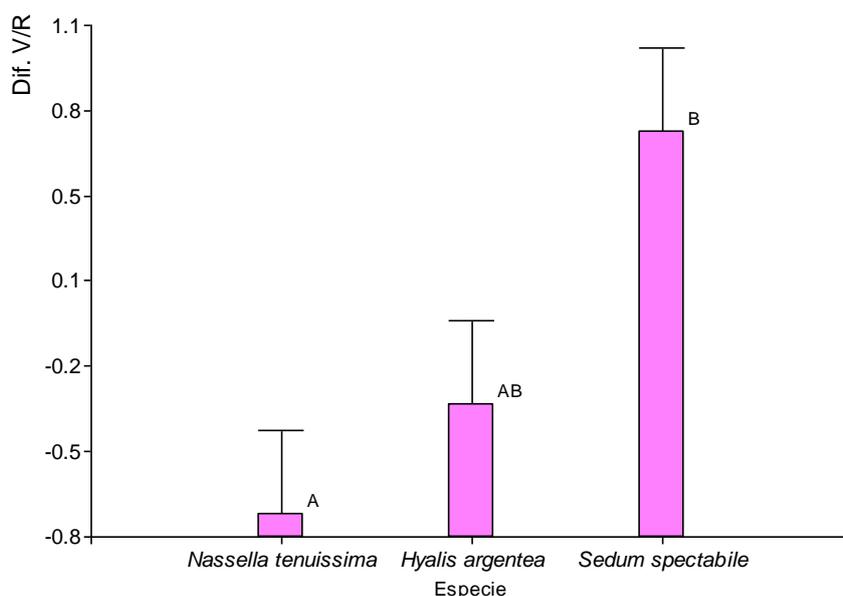


Figura 27: Diferencia de relación vástago-raíz de especies arbustivas (diferencia entre peso fresco y peso seco). Letras diferentes indican diferencia significativa en relación vástago-raíz entre especies (Test: Tukey; Alfa: 0,05).

Conclusiones de investigación de respuesta biológica de cubiertas vegetadas

A. COBERTURA VEGETAL

La cobertura vegetal nos indica el crecimiento de las plantas y la ocupación porcentual de la superficie. Se concluye que las especies *Lampranthus multiradiatus*, *Sedum lineare*, *Aptenia cordifolia*, *Cynodon dactylon*, *Zephyranthes candida*, *Hyalis argentea*, *Nassella tenuissima* y *Aristida purpurea* han demostrado una tendencia creciente al aumento de su cobertura vegetal.

Sedum spectabile y *Zephyranthes candida*, han tenido un aumento inicial de cobertura con oscilaciones en algunos periodos de acuerdo al comportamiento estacional de cada especie y sus periodos de receso vegetativo -invierno para la primera y verano para la segunda-.

En el periodo final evaluado de las cubiertas vegetadas, luego de 4 años de cultivo, las especies que han presentado cobertura mayor al 50% fueron: *Sedum lineare*, *Aptenia*

cordifolia, *Cynodon dactylon*, *Zephyrantes candida*, *Hyalis argentea*, *Nassella tenuissima* y *Aristida purpurea*. Esto último desataca su potencial de uso para cubiertas vegetadas. En particular, las especies de mejor adaptación en términos de cobertura vegetal fueron *Aptenia cordifolia* (87.9 %), *Cynodon dactylon* (89.5 %), *Hyalis argentea* (85.6 %) y *Nassella tenuissima* (72.3 %).

En función del análisis de las estaciones extremas, las especies *Aptenia cordifolia* 87%, *Cynodon dactylon* 86%, *Hyalis argentea* 85%, *Nassella tenuissima* 70% y *Sedum spectabile* 70%, presentaron un buen comportamiento de verano. En cambio, para el invierno y atendiendo a la condición caducifolia de algunas especies, las que mejor se comportaron fueron: *Cynodon dactylon* 69% y *Nassella tenuissima* 65%.

B. CONDUCTANCIA ESTOMÁTICA

La conductancia estomática expresa cuán abiertos están los estomas en la planta. La adaptación de las plantas a la aridez local y a la baja disponibilidad de agua en el sustrato podría evaluarse a través de la capacidad de “manejar” la apertura estomática de cada especie de modo de realizar las funciones vitales como fotosíntesis y respiración, pero con una apertura eficiente de los estomas que no facilite una transpiración extrema que cause estrés hídrico. Además, la cuantificación de la conductancia estomática puede indicar cuánto se facilitan los procesos de fijación de CO₂ y la liberación de O₂ y agua, con los beneficios que esto implica al ambiente.

La especie *Sedum lineare* es la especie que más responde al riego (CE=185 mmol/m².s), ya que se observa una diferencia significativa entre la apertura de estomas antes y después del riego, además de una mayor apertura de estomas aún previo al riego en comparación con todas las demás especies evaluadas. *Aptenia cordifolia* tiene un comportamiento similar al descrito para *Sedum lineare*, con la diferencia que su conductancia estomática previa al riego es menor y se encuentra en el rango de la mayoría de las especies (54.0 mmol/m².s para *Aptenia cordifolia*). *Gazania rigens* (CE PrevioR=11.8 mmol/m².s, CE PosteriorR=35.4 mmol/m².s) es la tercera especie que presenta diferencia significativa en cuanto a la diferencia de conductancia estomática entre ambos momentos, previo y posterior al riego, pero entre valores muy próximos. Se destaca también *Sedum acre*, que presenta valores muy cercanos para los momentos previos y posteriores al riego, diferenciándose del resto de las especies con conductancias mayores (CE PrevioR=148.9 mmol/m².s, CE PosteriorR=173.5 mmol/m².s).

Una mayor apertura estomática posterior al riego, permitiría mayor tasa transpiratoria y pérdidas de agua, pero más disponibilidad de CO₂ para asimilar a través de la fotosíntesis e incrementar la masa vegetal.

Para el año 2017 se observa que las especies con diferencia significativa son *Cynodon dactylon* y *Hyalis argentea*, además, ésta última también presenta diferencias significativas entre los momentos previo y posterior al riego para el año 2018. *Cynodon dactylon* es una especie que para mantener viva la parte aérea y no evidenciar síntomas de amarillamiento foliar necesita riegos frecuentes, pero también presenta la característica de poseer órganos de reserva que facilitan el rebrote luego de lluvias, más aún si los días no presentan altas temperaturas. En el contexto del año 2017, la especie se encontraba

más activa y respondió mejor con la apertura estomática a los momentos previo y posterior al riego.

Hyalis argentea es una especie nativa que por esta condición presenta una marcada adaptación a las condiciones ambientales locales, pero por otro lado no vegeta comúnmente en sustratos ricos en materia orgánica. Esto podría indicar que con la mineralización del sustrato desde la implantación hasta el año 2017 y la adaptación de esta especie al sistema, adquirió aptitudes de respuesta al microclima imperante en las cubiertas vegetadas durante el período evaluado, lo que se tradujo en un manejo más eficiente de la apertura estomática y por ende de la conductancia, para ser más conservativa en términos de administración del recurso hídrico.

C. TEMPERATURA DE HOJA

Esta variable es un indicador de la temperatura de la planta. Las especies *Aristida purpurea*, *Gazania rigens* y *Sedum acre* presentan valores muy cercanos de temperatura de hoja entre ambos momentos anteriores o posteriores al riego por lo cual se puede inferir que no responderían al aporte de agua. En cambio, especies que responden positivamente al riego y presentan diferencias significativas en este indicador entre ambos momentos se puede interpretar que se activa su metabolismo, el cual se podría haber encontrado ralentizado debido a condiciones de riego deficitario.

Se puede observar para el año 2016 que la menor temperatura de hoja medida previo a un riego en condiciones de estrés la presenta la especie *Cynodon dactylon* (34.5 °C) pero también presenta el menor valor luego del riego (37.6 °C), lo cual podría deberse a su estado de amarillamiento (actividad metabólica reducida) en la estación de verano. Las mayores diferencias entre ambos momentos, expresadas en diferencias entre valores medios por momentos, las presentan las especies *Aptenia cordifolia* (3.0 °C), *Cynodon dactylon* (3.5 °C), *Hyalis argentea* (2.9 °C), *Nassella tenuissima* (4.4 °C), *Sedum lineare* (3.4 °C), *Sedum spectabile* (6.0 °C) y *Zephyrantes candida* (3.9 °C).

Para el año 2017 sólo presentan diferencias significativas entre ambos momentos con respecto al estado hídrico en la temperatura de hoja, dos especies, *Cynodon dactylon* (5.0 °C) y *Sedum spectabile* (1.2 °C), y sólo la primera especie no presenta valores cercanos entre ambos momentos.

Para el tercer año, 2018, se observa que son 5 las especies que presentan diferencias significativas en cuanto a la temperatura de hoja entre ambos momentos: *Aptenia cordifolia* (1.0 °C), *Lampranthus multiradiatus* (1.2 °C), *Sedum lineare* (0.9 °C), *Sedum acre* (2.4 °C) y *Sedum spectabile* (1.8 °C). Las especies que han presentado diferencia responden a la característica de ser plantas del tipo “carnosa”, “crasa” o “suculenta”, metabolismo originalmente adaptado a condiciones de zonas áridas donde la humedad es baja y la temperatura y la radiación son altas.

Esto último, evidencia que luego de 3 años de evaluación en el que las plantas están en condiciones restringidas de contenido de agua de sustrato -riegos mínimos-, estas plantas continúan con su metabolismo activo y adaptadas al sistema y al medio de cultivo.

Hyalis argentea y *Nassella tenuissima*, ambas especies nativas, muestran otra estrategia de adaptación a zonas áridas evitando captar la intensa radiación solar mediante el

desarrollo de hojas finas y orientadas con dirección paralela a la incidencia de los rayos solares. Esto puede justificar que al final del ensayo experimental estas especies no presenten diferencias significativas en temperatura de hoja entre ambos momentos. No obstante, sí presentan los menores valores (PrevioR:40.71 °C y PosteriorR:40.48 °C para *Nassella tenuissima*; PrevioR:35.6 °C y PosteriorR:36.5 °C para *Hyalis argentea*) de temperatura en ambos momentos -previo y posterior al riego-.

D. CONSUMO HÍDRICO

Con respecto al riego complementario, la especie más eficiente, es decir la de menor consumo hídrico, es *Aptenia cordifolia* con 217 l/año y la de mayor consumo es *Sedum acre* con 229 l/año. Para un consumo hídrico medio anual que oscila en un rango de 12 litros, las especies *Aptenia cordifolia*, *Sedum lineare*, *Cynodon dactylon* y *Zephyranthes candida* se encuentran en el tercio de menor consumo (217-221 l/año). *Nassella tenuissima*, *Gazania rigens* y *Hyalis argentea* se encuentran en un rango medio (221-225 l/año); y *Lampranthus multiradiatus*, *Sedum spectabile*, *Aristida purpurea* y *Sedum acre* son las especies de mayor consumo (225-229 l/año).

Es decir que *Aptenia cordifolia* resultó ser la especie de menor consumo hídrico con 217 l/año y *Sedum acre* la de mayor con 229 l/año. Esto demuestra que implantar una cubierta vegetada con especies ampliamente utilizada en otros países, no siempre es adecuado localmente, en este caso debido al mayor consumo de agua -en para un contexto árido y de escaso recursos hídricos limitados- y a una cobertura vegetal inferior al 50%.

Aunque las diferencias de consumo no muestran variaciones impactantes en términos numéricos, es necesario considerar que refieren a una superficie de un metro cuadrado y que la implementación masiva de cubiertas vegetadas a escala urbana, podría significar grandes superficies de techos vegetados y en consecuencia adquieren relevancia los consumos diferenciales.

El aprovechamiento de las precipitaciones captado por el sustrato y la canopia vegetal permite incorporar un volumen adicional de agua complementario al aportado por el riego por goteo. Es decir, no se pierde por escorrentía o drenaje. Del análisis del volumen registrado por precipitaciones, se observa que las especies con menor aprovechamiento del agua de lluvia fueron *Gazania rigens* y *Aristida purpurea*, que son las de menor cobertura vegetal. En cambio, las especies restantes logran aprovechar más del 60% del agua de lluvia, siendo *Nassella tenuissima* la especie que mejor incorpora el agua proveniente de las precipitaciones en un porcentaje del 75%.

E. PESAJE DE CUBIERTAS VEGETADAS

La capacidad portante de las cubiertas edilicias define un límite al peso que puede adicionar esta tecnología verde. La diferencia de peso o el aumento de peso desde la implantación del cultivo hasta su estado definitivo en la cubierta, explica el crecimiento de cada especie vegetal por metro cuadrado y el peso final nos dice cuánto es el aporte del sistema total integrado: sustrato-plantas-sistema de riego por metro cuadrado.

Sedum spectabile es la única especie que se diferencia de forma significativa del resto con un aumento de peso mayor a todas las demás, con un valor de 45 kg/m² (probablemente debido a su condición de planta carnosa -crasulácea- que reserva agua en

tallos y hojas como mecanismo de adaptación a la sequía). Las demás especies no superan los 30 kg/m² de aumento de peso. Del mismo modo, *Sedum spectabile* es también la especie de mayor peso final diferenciándose significativamente de las demás con un peso de 81 kg/m². La especie nativa *Nassella tenuissima* es la especie que se diferencia con el resto por presentar el menor peso final por metro cuadrado, con valores próximos a los 55 kg/m².

Especies vegetales sugeridas a utilizar en cubiertas vegetadas para zonas áridas

A continuación, se indica con una cruz (X) para cada una de las 14 especies -evaluadas a través de ensayos experimentales- las que presentan mejores aptitudes con respecto a cada variable de respuesta biológica analizada.

ID	ESPECIE	COBERTURA VEGETAL	CONDUCTANCIA ESTOMÁTICA	TEMPERATURA DE HOJA	CONSUMO HÍDRICO	PESAJE
1	<i>Sedum lineare</i>			X	X	X
2	<i>Hyalis argentea</i>	X	X	X	X	X
3	<i>Zephyranthes candida</i>				X	X
4	<i>Lampranthus multiradiatus</i>			X		X
5	<i>Aptenia cordifolia</i>	X		X	X	X
6	<i>Cynodon dactylon</i>	X		X	X	X
7	<i>Thymus vulgaris</i>				X	X
8	<i>Hymenoxys acaulis</i>				X	X
9	<i>Sedum spectabile</i>	X		X		
10	<i>Nassella tenuissima</i>	X		X	X	X
11	<i>Verbena rigida</i>				X	X
12	<i>Gazania rigens</i>				X	X
13	<i>Sedum acre</i>			X		X
14	<i>Aristida purpurea</i>					X

CAPÍTULO 4: RESPUESTA TÉRMICA DE CUBIERTAS VEGETADAS EN ZONAS ÁRIDAS

RESUMEN

A nivel mundial es muy difundido el uso de especies del género *Sedum*, no obstante, poco se conoce del comportamiento de especies nativas o exóticas adaptadas localmente en cubiertas vegetadas, que serían de mejor ajuste al sistema y menor mantenimiento. Este capítulo compara especies utilizadas internacionalmente, respecto a especies nativas e introducidas de mayor disponibilidad local para Mendoza-Argentina, en base a respuestas eficientes en términos térmicos. El comportamiento térmico se evaluó en tres box experimentales, en dos de ellos se rotaron las cubiertas vegetadas. Los resultados del comportamiento térmico demuestran que las cubiertas vegetadas amortiguan en forma significativa la temperatura exterior, reduciendo 2 °C a 3 °C la temperatura media interior y 7 °C a 9 °C la amplitud térmica. Cubiertas vegetadas con la especie nativa *Nassella tenuissima* ha presentado la menor temperatura interior, superficial, de sustrato y de hoja. Por tanto, se han detectado especies de disponibilidad local, de bajo requerimiento hídrico y de mejor desempeño térmico con potencial de incorporación para cubiertas vegetadas de zonas áridas. Los programas de simulación son fundamentales en el proceso de diseño a escala urbana y edilicia, dado que permiten comprender cómo funciona cada uno de los componentes. A escala edilicia, metodológicamente se utilizó el software EnergyPlus para ajustar modelos numéricos a mediciones experimentales, analizar los parámetros descriptivos de los modelos y calcular el consumo energético. Los resultados indican que la incorporación de una cubierta vegetada reduce los consumos de energía respecto a una cubierta tradicional en al menos el 40 %. A escala urbana, se trabajó con el software de predicción del microclima urbano ENVI-met y se encontró que alta densidad constructiva se maximizan los beneficios de las cubiertas vegetadas al compararla con la media y baja densidad. Las mayores diferencias se encontraron en las temperaturas máximas.

I-Metodología de investigación de respuesta térmica de cubiertas vegetadas a través de ensayos experimentales

Con el fin de ensayar el comportamiento térmico de cubiertas vegetadas con las especies de mejor respuesta biológica, se ha realizado un diseño experimental en el que se prueba la tecnología de cubierta diseñada a escala y en comparación con la tecnología de cubierta que tradicionalmente es utilizada en la región. Además, se diseñaron protocolos de medición, con puesta a punto a campo, con el fin de cuantificar las principales variables con sensores de alta precisión en ensayos experimentales.

A. DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental persigue la comparación de cubiertas vegetadas con cubiertas tradicionales. Para tal fin, se analizó en forma comparativa el comportamiento térmico bajo la influencia de cubiertas vegetadas (2), respecto a una (1) cubierta tradicional en tres box de ensayo, orientados de oeste a este, como se puede observar en la Figura 28. Se tomó de base la metodología propuesta por La Roche (2009) para climas cálidos secos que consiste en el desarrollo y monitoreo térmico de ensayos bajo condiciones controladas, con adaptaciones de los detalles constructivos locales respecto a tecnologías de cubierta. Estos ensayos experimentales se realizaron en el área experimental del CCT CONICET Mendoza (detallado más ampliamente en “Área de estudio” en el capítulo Introducción).

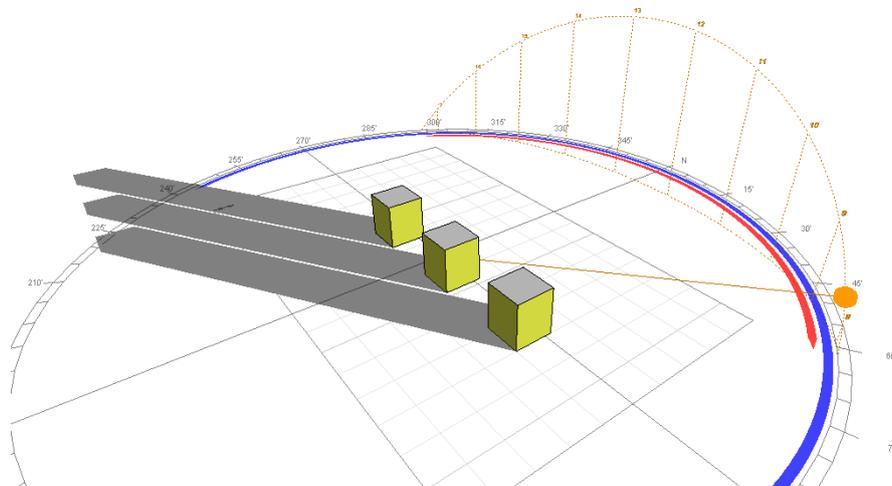
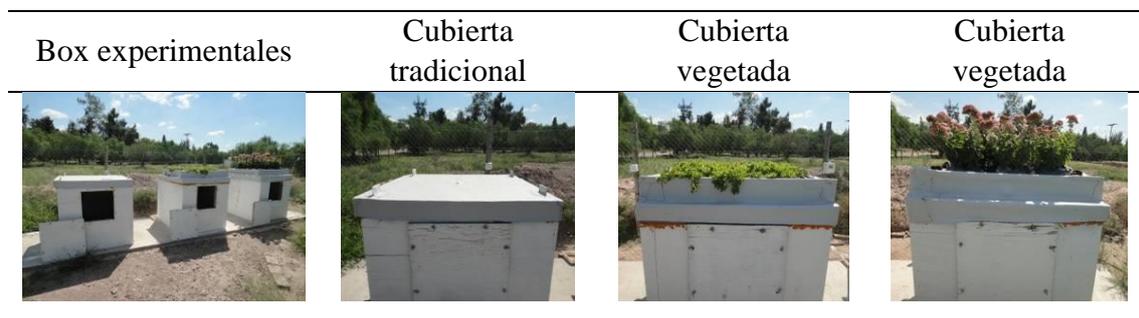


Figura 28: Box experimentales para evaluación de desempeño térmico de cubiertas vegetadas. Se indica abajo un gráfico en Ecotect para el 21 de junio a las 9:15 hs con sombras proyectadas entre los tres box experimentales.

Los box de ensayos conforman volúmenes ciegos de 1 m³ con el fin de representar una sección de cubierta a escala con el resto de la envolvente aislada térmicamente. Esto permite estudiar los fenómenos de transferencia de calor y la temperatura interior resultante de diferentes tecnologías de cubierta, quitando los efectos de pisos y muros. Exteriormente los box tienen una terminación que les permite estar a la intemperie y las paredes y pisos en el interior han sido diseñadas para que cuenten con, al menos, un contenido mínimo de masa térmica que estabilice el comportamiento térmico interior. Además, los box experimentales se han apoyado en un contrapiso de hormigón armado de 15 cm de espesor para que no estén expuestos a la humedad del suelo que aceleraría su deterioro.

Muros y pisos están compuestos por tres capas: placa cementicia en la cara interior (espesor 10 mm), aislación térmica de poliestireno expandido de baja densidad (espesor 50 mm) y placa de fenólico en la cara exterior (espesor 18 mm), acabado esmalte sintético color blanco (Figura 29). La cubierta del techo es de hormigón armado -a fin de representar el tipo constructivo comúnmente empleado en la resolución de techos en el parque edilicio del AMM- (espesor 150 mm; peso específico 2400 Kg/m³; dosificación en volumen: 1-3-3 cemento, árido grueso y fino, y está aislada hidráulicamente con una membrana Sika® Sarnafil F 610-12 Felt. Sarnafil® F 610-12 Felt es una membrana multicapa para impermeabilizar cubiertas, confeccionada en polivinilcloruro (PVC) de calidad premium, con una malla de fibra de vidrio no tejida en su interior y con un respaldo de fieltro poliéster. Resistente a los rayos UV. Es un material de impermeabilización de cubiertas con sistema completamente adherido con las siguientes ventajas: excelente resistencia a la intemperie incluso con exposición permanente a los rayos UV, excelente flexibilidad aun a bajas temperaturas, estabilidad dimensional, permeable al vapor, excelente soldabilidad, alta durabilidad y no hay riesgo de laminación.

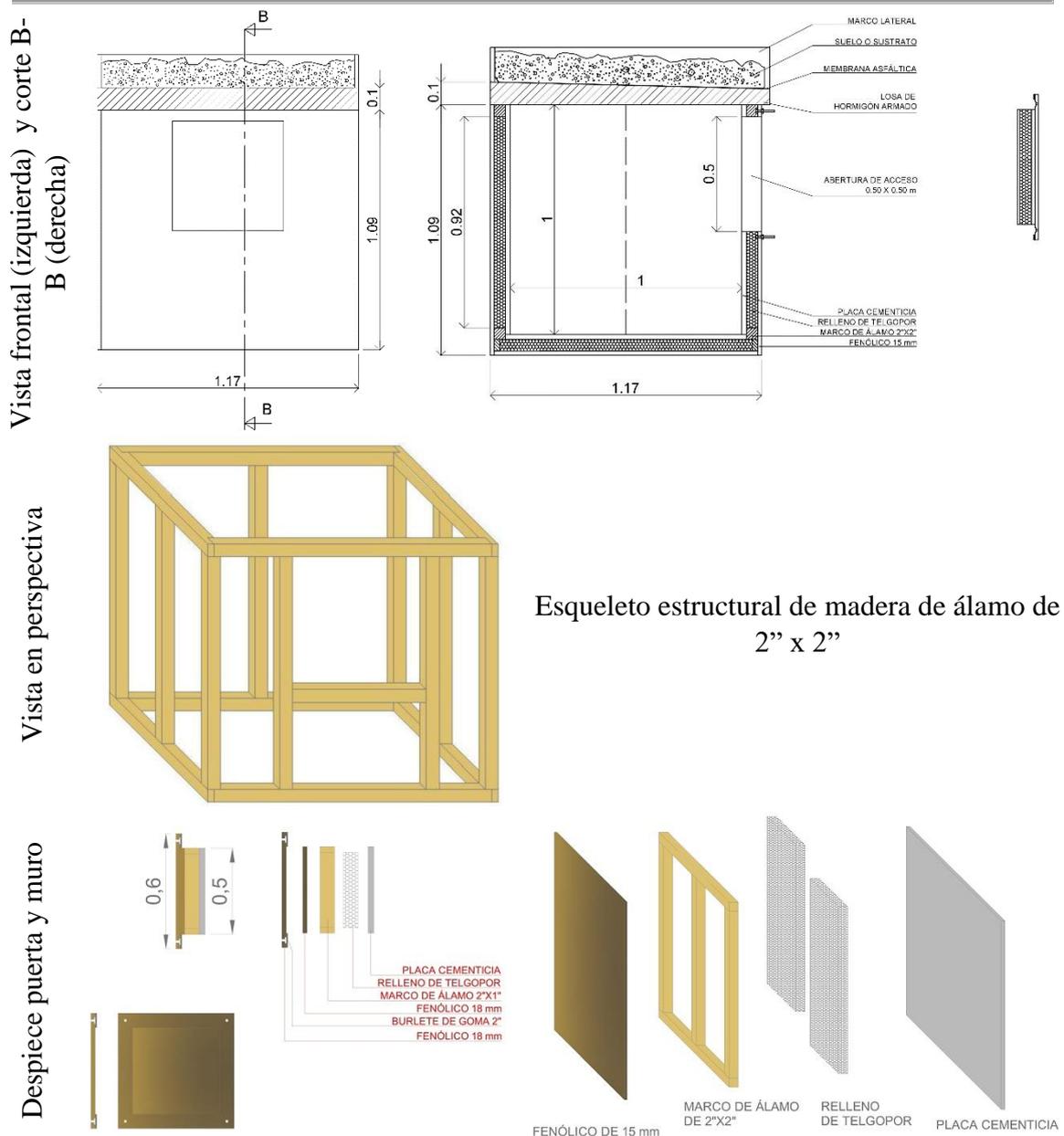


Figura 29: Detalles constructivos de box experimentales

Sobre los box destinados a cubiertas vegetadas se colocó, además, un manto drenante Sika® GR Aquadrain Extensivo que separa la capa de cultivo de la membrana hidrófuga de la losa de hormigón y sobre ella la capa de cultivo. Sika® GR Aquadrain Extensivo es un manto de drenaje para cubiertas ajardinadas confeccionado en base a fibras de Polipropileno (PP) reforzadas mecánicamente. Se utiliza como capa de protección, drenaje y retención de agua para sistemas de cubiertas verdes extensivas con una pendiente mínima de 1,5%. El producto cumple tres funciones: drenaje, filtrado y protección. Tiene las ventajas de ser adecuado para cubiertas verdes extensivas con pendientes mínimas de 1,5 %, fácil de aplicar, es imputrescible y no es estable ante los rayos UV.

B. CASOS DE ESTUDIO

A partir del universo de análisis de catorce especies vegetales (14) evaluadas desde el punto de vista de su respuesta biológica, se seleccionó un conjunto de seis especies vegetales para evaluar el comportamiento térmico de cubiertas vegetadas con especies de adaptación regional -*Sedum spectabile*, *Aptenia cordifolia*, *Nassella tenuissima*, *Hyalis argentea*, *Cynodon dactylon*- en comparación con una de las más utilizadas a nivel internacional -*Sedum lineare*- (Figura 30).

Esta selección se basó inicialmente en aquellas de mejor respuesta biológica. Las primeras cinco especies se destacaron en las siguientes tres variables de respuesta: sobrevivencia, adaptabilidad y eficiencia para con el sistema y el entorno evaluado a través de su poder tapizante y su consumo hídrico. A dichas variables se adicionan dos considerandos de impacto en la respuesta térmica de las cubiertas vegetadas: distintos hábitos de crecimiento o arquitectura de la planta -erguido, rastrero- y la persistencia del follaje -caduca, perenne- (Tabla 7).

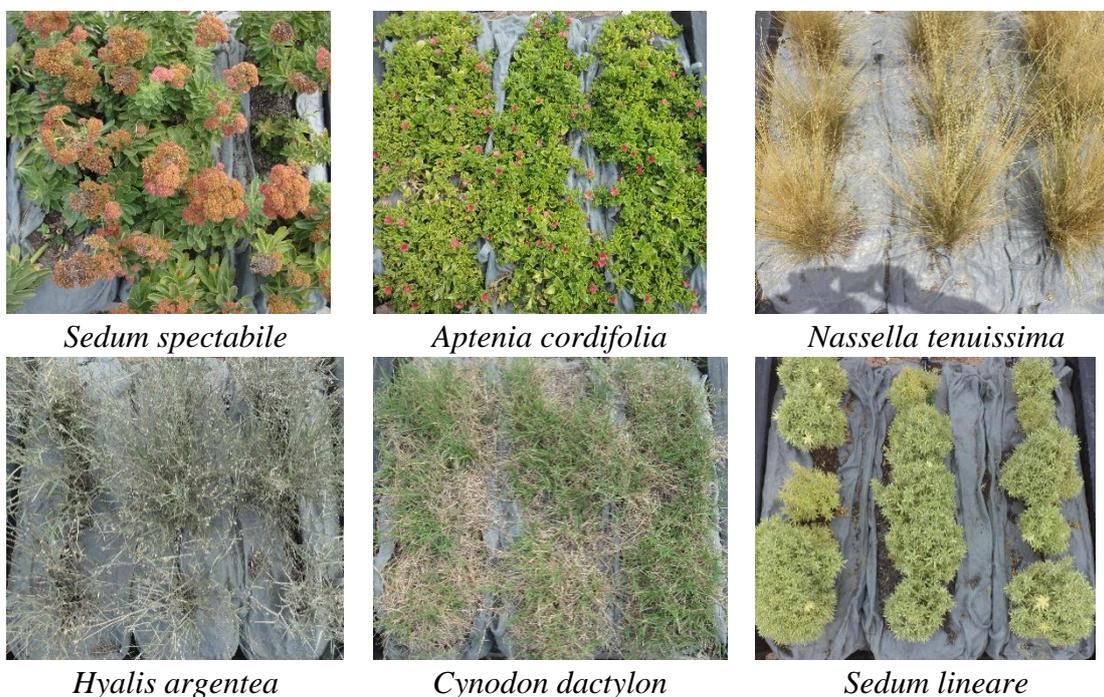


Figura 30: Especies seleccionadas para evaluar respuesta térmica.

Especie	Origen	Hábito de crecimiento	Persistencia de follaje	Tipo de planta
<i>Sedum spectabile</i>	Exótico	Erguida	Caduca. Pierde la parte aérea en invierno	Carnosa
<i>Aptenia cordifolia</i>	Exótico	Rastrera	Perenne	Carnosa
<i>Nassella tenuissima</i>	Nativa	Erguida	Perenne	Cespitosa
<i>Hyalis argentea</i>	Nativa	Erguida	Perenne	Arbustiva
<i>Cynodon dactylon</i>	Exótico	Rastrera	Perenne. Con permanencia de follaje seco en invierno	Cespitosa
<i>Sedum lineare</i>	Exótico	Rastrera	Perenne	Carnosa

Tabla 7: Principales características de las especies evaluadas

C. MÉTODO DE MEDICIÓN

El comportamiento térmico de las cubiertas vegetadas en sí mismas y de los espacios interiores se evaluó a partir del registro de variables meteorológicas (temperatura de aire exterior e interior-, temperatura y contenido de agua del sustrato, y temperatura superficial de la losa), tomadas estacionalmente durante ciclos de medición de 14 días. Los datos se registraron cada 15 minutos bajo la siguiente configuración: cinco microadquisidores de datos por box con cubierta vegetada, tres sensores en el box con cubierta tradicional y un sensor de referencia en el espacio exterior (Figura 31). La ubicación de los sensores se determinó en función de un conjunto de ensayos dirigidos a determinar la posición más representativa respecto a la variable a medir y evitar la influencia de factores externos sobre la misma. La Termocupla EL-USB-TC registró la temperatura superficial cada 5 min a excepción de los otros equipos, ya que la configuración no permite hacerlo cada 15 min.

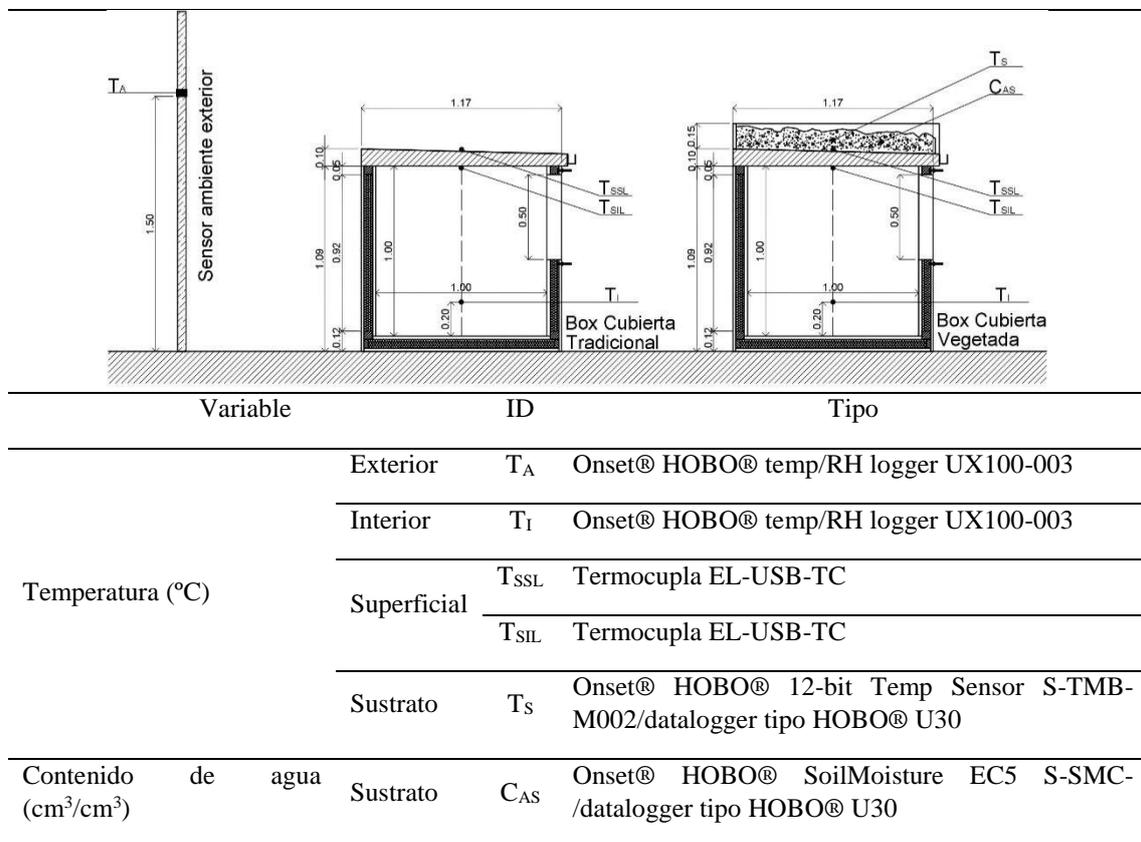


Figura 31: Método de medición e instrumental utilizado.

En el ambiente exterior se midió radiación solar total sobre la superficie horizontal (W/m²) con un piranómetro del tipo Star Pyranometer Mod3040-A Weather Tronic y velocidad de viento (km/h) con un anemómetro del tipo Micro Response Anemometer Mod 2030 Weather Tronic. El almacenamiento de datos de ambos sensores se realizó en una Plataforma Adquisidora de Datos del tipo Secure Digital (SD).

D. MÉTODOS DE TOMA DE DATOS**D.1. TEMPERATURAS DE SUSTRATO, DE AIRE Y SUPERFICIALES
EN ENSAYOS EXPERIMENTALES****D.1.1. Temperatura y contenido de agua del de sustrato**

Los sensores para monitorear tanto el contenido de agua, como la temperatura de sustrato se conectaron a una estación del tipo datalogger HOBOWARE® U30 (Figura 32). Esta estación meteorológica resistente es una solución de monitoreo ambiental más duradera para la intemperie. La estación meteorológica HOBOWARE U30-NRC se puede configurar fácilmente para adaptarse a las necesidades de su aplicación. Tiene hasta 15 canales para recopilar datos ambientales y luego cargarlos en el software HOBOWARE® para su análisis.

El registrador de datos U30-NRC admite las siguientes medidas: 4-20 mA, corriente alterna, voltaje de CA, velocidad del aire, amperio hora (Ah), amperios (A), presión barométrica, dióxido de carbono, flujo de aire comprimido, corriente continua, voltaje de CC, Presión diferencial, presión manométrica, kilovatios hora (kWh), kilovatios (kW), humedad de la hoja, intensidad de la luz, factor de potencia (PF), entrada de pulso, precipitación, humedad relativa, humedad del suelo, temperatura, comp. Orgánico volátil, voltios Reactivo de amperios, hora reactiva de voltios amperios, voltios-amperios (VA), voltios (V), caudal de agua, nivel de agua, vatios hora (vatios), vatios (W) y viento.



Figura 32: Datalogger HOBOWARE® U30

D.1.1.a. Temperatura de sustrato

El sensor Onset® HOBOWARE® 12-bit Temp Sensor S-TMB-M002 (Figura 33) de temperatura de sustrato está diseñado para funcionar con estaciones HOBOWARE con un conector modular enchufable que permite conectarlo fácilmente. Todos los parámetros del sensor se almacenan dentro del mismo, que comunica automáticamente la información de configuración a la estación sin ninguna programación o configuración extensa del usuario. Este sensor puede usarse en aire o suelo. El sensor está diseñado para durar al menos un año en agua tan cálida como 50 °C. Si el sensor está continuamente expuesto al agua durante más de un año, eventualmente va a la deriva. No es recomendable la exposición al agua a más de 50 °C, lo cual puede reducir significativamente la vida del sensor. Las especificaciones técnicas del sensor Onset® HOBOWARE® 12-bit Temp Sensor S-TMB-M002 se presentan en la Tabla 8.

Temperatura	
Rango de medición	-40°C a +100°C
Precisión	< ±0.2°C de 0° a 50°C
Resolución	<0.03°C de 0° a 50°C
Tiempo de respuesta	<2 minutos típico, con movimientos de flujo de aire de 2 m/s; <1 minuto típico en baño de agua agitado

Tabla 8: Especificaciones de los sensores Onset® HOBO® 12-bit Temp Sensor S-TMB-M002.



Figura 33: Sensor Onset® HOBO® 12-bit Temp Sensor S-TMB-M002.

D.1.1.b. Contenido de agua del sustrato

Este sensor de contenido de agua del sustrato Onset® HOBO® SoilMoisture EC5 S-SMC- (Figura 34) presenta un diseño de dos dientes para una fácil instalación. Además, el EC-5 es un sensor inteligente que permite a los usuarios iniciar sistemas de monitoreo de manera rápida, fácil y asequible. Como los registradores de datos HOBO reconocen este sensor, no se requiere una programación o configuración complicada. El EC-5 se integra con el sensor ECH2O™ probado en campo y un A / D de 12 bits. Proporciona ± 3% de precisión en condiciones típicas del suelo, y ± 2% de precisión con calibración específica del suelo. Las lecturas se proporcionan directamente en el contenido de agua volumétrica. Este sensor está diseñado para mantener baja sensibilidad a la salinidad y efectos de textura. Las especificaciones técnicas del sensor Onset® HOBO® SoilMoisture EC5 S-SMC- se presentan en la Tabla 9.

Contenido de agua de sustrato	
Rango de medición	-0.401 to 2.574 m ³ /m ³
Precisión	±0.031 m ³ /m ³ (±3.1%) típicamente de 0 a 50°C
Resolución	0.0007 m ³ /m ³ (0.07%)
Tiempo de respuesta	-

Tabla 9: Especificaciones de los sensores Onset® HOBO® SoilMoisture EC5 S-SMC-



Figura 34: Sensor Onset® HOBO® SoilMoisture EC5 S-SMC-.

D.1.2. Temperatura de aire interior y exterior

Para cuantificar la temperatura interior de los box experimentales y la temperatura exterior se utilizaron sensores del tipo HOBO UX100-003, con dos canales internos: Temperatura y Humedad Relativa. En la Tabla 10 se observan las especificaciones de cada sensor interno según el fabricante.

El instrumental de medición para la temperatura exterior fue colocado en el interior de una caja de material plástico, perforada en cuatro de sus caras, orientados en sentido Sur-Este, instalados en un poste de madera a una altura de 1,5 metros (Oke, 2004) (Figura 35).

El instrumental fue calibrado, exponiendo los equipos durante 7 días a condiciones similares de medición, al aire libre y en días claros. Los datos obtenidos se ordenaron y se ajustaron con una curva patrón de calibración, dicha curva fue obtenida de registros tomados por la estación PEGASUS ubicada dentro del predio del CCT Mendoza-Conicet, próxima a los sensores y en las mismas condiciones de asoleamiento. Posteriormente se realizaron gráficos de dispersión para cada sensor respecto al patrón, obteniendo las funciones de calibración.

	Temperatura	Humedad Relativa
Rango de medición	-20°C a +70°C	15% a 95% RH
Precisión	±0.21°C de 0° a 50°C	±3.5% de 25% a 85% a 25 °C
Resolución	0.024°C a +25°C	0.07% a 25°C
Tiempo de respuesta	4 minutos en flujo de aire de 1 m/s	43 segundos a 90% en flujo de aire de 1 m/s

Tabla 10: Especificaciones de los sensores internos del HOBO UX100-003.



Figura 35: Fotografías del equipamiento utilizado en el interior de box experimentales y en el exterior.

D.1.3. Temperatura superficial

Se midió la temperatura superficial de la losa en la cara inferior (cara que mira hacia el interior del box) y en la cara superior (a nivel de membrana) de cada cubierta con termocuplas tipo T incorporadas a dataloggers LASCAR ELUSB-TC, censando cada 5 minutos. La termocupla colocada sobre la membrana de la cubierta tradicional, al no tener la protección de la cubierta vegetada sobre ella y estar expuesta al sol, fue protegida con una media caña de poliestireno expandido para evitar irradiancias que dieran mediciones sobreestimadas (Figura 36).

Las termocuplas tipo T incorporadas a data loggers LASCAR ELUSB-TC tienen un rango de medición de -35 a 80°C (-31 a $+176^{\circ}\text{F}$) con una precisión de $\text{Typ}\pm 1^{\circ}\text{C}$ ($\pm 2^{\circ}\text{F}$), capacidad de 16.382 lecturas y una batería de $3.6\text{ V } \frac{1}{2}\text{AA}$ con una vida de 1 año.



Figura 36: A la izquierda termocupla envainada colocada a nivel de membrana en la cubierta tradicional y a la derecha termocuplas tipo T incorporadas a dataloggers LASCAR ELUSB-TC en el interior de box experimental.

D.1.4. Criterios para selección de días típicos. Comportamiento típico de verano

Para la selección de días representativos de verano ha sido evaluado previamente cuál es el comportamiento térmico esperado estival con el fin de elegir, en una segunda etapa, los días que más representan esta estación dentro de los periodos de medición. A partir de la comparación de los datos obtenidos en dichos periodos con la temperatura media de verano para la serie temporal 1983-2017. La misma muestra una tendencia de crecimiento ascendente (Figura 37). Por esta razón la elección de los días de análisis responde a días cálidos y soleados, alejados de ocurrencia de precipitaciones y frentes fríos. Se persigue cuantificar el comportamiento térmico de las cubiertas vegetadas en los días más demandantes de energía auxiliar para alcanzar condiciones de confort térmico interior.

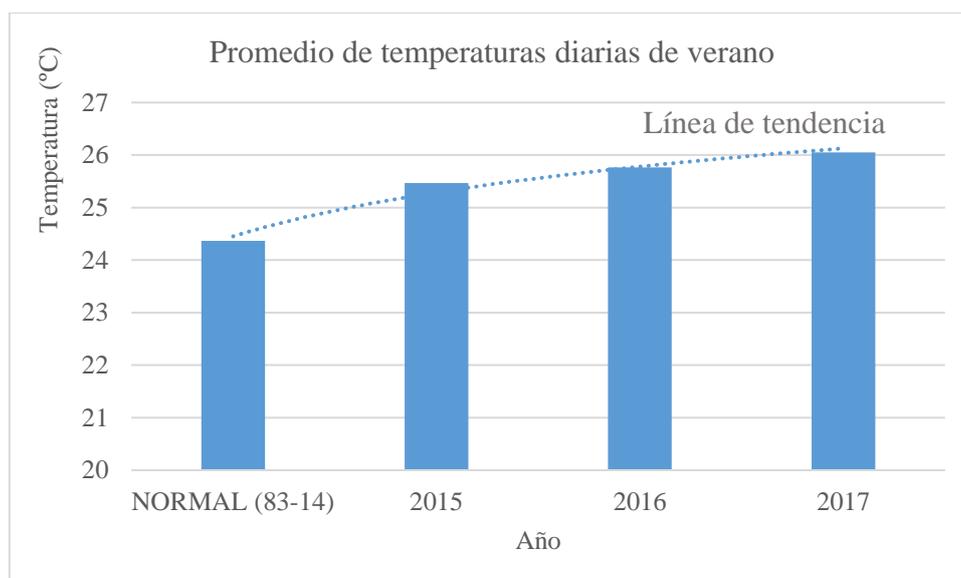


Figura 37: Temperatura promedio de meses de verano 1983-2017.

D.1.5. Selección de los días de análisis

Se realizaron 4 ciclos de medición de 14 días cada uno, comparando simultáneamente, dos cubiertas vegetadas distintas -diferentes especies- respecto a la cubierta tradicional. Cada par de cubiertas vegetadas busca evaluar comparativamente el comportamiento de dos especies vegetales diferentes con características opuestas. Cumplido el primer ciclo establecido, se rotaron las cubiertas vegetadas y se comenzó un nuevo ciclo de medición. Estos ciclos de medición estuvieron comprendidos en un periodo de tiempo que transcurrió desde el 15 de diciembre de 2016 hasta el 15 de febrero de 2017. Se consideró este periodo en particular porque las plantas ya se encontraban adaptadas al sistema y al ambiente; y su comportamiento térmico sería el de una cubierta vegetada que se encuentra estable en términos de crecimiento y cobertura. Las características biológicas de estas especies se describieron en detalle en el capítulo 3: Respuesta biológica.

Ciclo	Imagen
<p><u>Primer ciclo:</u> Cubierta tradicional (CT) Box oeste</p> <p>Cubierta vegetada con: <i>Sedum lineare</i> (CVSI) Box central</p> <p><i>Nassella tenuissima</i> (CVNt) Box este</p>	
<p><u>Segundo ciclo:</u> Cubierta tradicional (CT) Box oeste</p> <p>Cubierta vegetada con: <i>Aptenia cordifolia</i> (CVAc) Box central</p> <p><i>Sedum spectabile</i> (CVSe) Box este</p>	

<p><u>Tercer ciclo:</u> Cubierta tradicional (CT) Box oeste</p> <p>Cubierta vegetada con: <i>Cynodon dactylon</i> (CVCd) Box central</p> <p><i>Hyalis argentea</i> (CVHa) Box este</p>	
<p><u>Cuarto ciclo:</u> Cubierta tradicional (CT) Box oeste</p> <p>Cubierta vegetada con: <i>Cynodon dactylon</i> (CVCd) Box central</p> <p><i>Aptenia cordifolia</i> (CVAc) Box este</p>	

- **PRIMER CICLO DE MEDICIÓN: CVSl, CVNt y CT**

De los 14 días que corresponden al período de medición, para el análisis del comportamiento térmico y el cálculo de ahorro energético se seleccionaron 4 días (recuadros de Figura 38) típicos de verano: soleados, con una temperatura media de 29.7 °C y una radiación global media de 392.3 W/m² y máxima de 1114.7 W/m² (Figura 38 y Tabla 11).

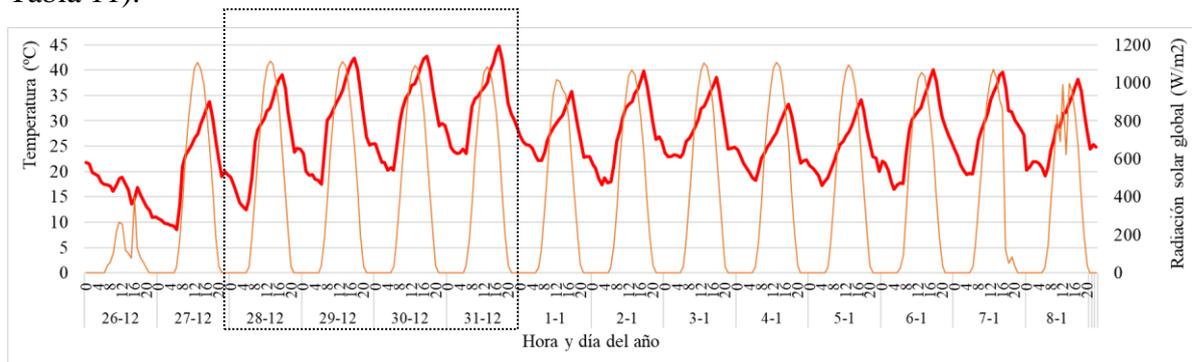


Figura 38: Primer ciclo de medición.

Días típicos	Temperatura (°C)	Radiación media (W/m ²)
Máxima absoluta	44.8	1114.7
Máxima media	42.2	1100.4
Media	29.7	392.3

Mínima media	20.4	0.0
Mínima absoluta	12.5	0.0

Tabla 11: Temperatura y radiación de días seleccionados para el primer ciclo de medición.

- **SEGUNDO CICLO DE MEDICIÓN: CVAc, CVSe y CT**

De los 14 días medidos, se seleccionaron 5 días (recuadros de Figura 39) típicos de verano: soleados, con una temperatura media de 29.1 °C y una radiación global media de 362.1 W/m² y una máxima de 1118.8 W/m² (Figura 39 y Tabla 12).

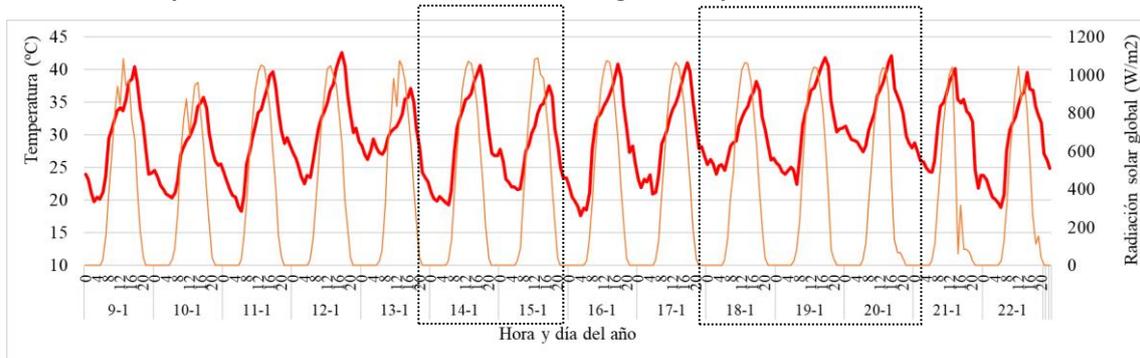


Figura 39: Segundo ciclo de medición.

Días típicos	Temperaturas medias (°C)	Radiación media (W/m ²)
Máxima absoluta	42.1	1118.8
Máxima media	36.5	1100.8
Media	29.1	362.09
Mínima media	16.9	0.0
Mínima absoluta	12.3	0.0

Tabla 12: Temperatura y radiación de días seleccionados para el segundo ciclo de medición.

- **TERCER CICLO DE MEDICIÓN: CVAc, CVSe y CT**

De los 14 días medidos, se seleccionaron 4. días (recuadros de Figura 40) típicos de verano: soleados, con una temperatura media de 29.5 °C y una radiación global media de 334.4 W/m² y una máxima de 1047.3 W/m² (Figura 40 y Tabla 13).



Figura 40: Tercer ciclo de medición.

Días típicos	Temperaturas medias (°C)	Radiación media (W/m ²)
Máxima absoluta	42.7	1047.3
Máxima media	41.0	1040.5
Media	29.5	334.4
Mínima media	19.6	0.0

Mínima absoluta	17.4	0.0
-----------------	------	-----

Tabla 13: Temperatura y radiación de días seleccionados para el tercer ciclo de medición.

- **CUARTO CICLO DE MEDICIÓN: CVAc, CVSe y CT**

De los 14 días medidos, se seleccionaron 5 días (recuadros de Figura 41) típicos de verano: soleados, con una temperatura media de 23.8 °C y una radiación global media de 309.4 W/m² y una máxima de 1053.2 W/m² (Figura 41 y Tabla 14).

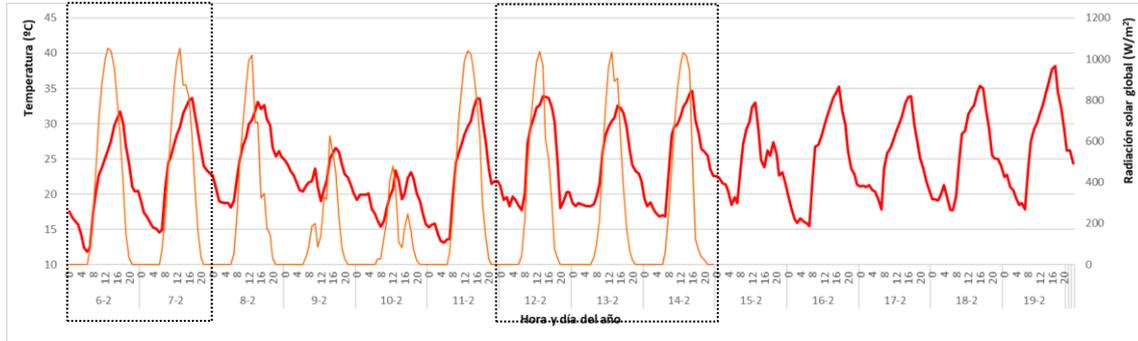


Figura 41: Cuarto ciclo de medición.

Días típicos	Temperaturas medias (°C)	Radiación media (W/m ²)
Máxima absoluta	34.6	1053.2
Máxima media	34.5	1042.1
Media	23.8	309.4
Mínima media	25.9	0.0
Mínima absoluta	11.9	0.0

Tabla 14: Temperatura y radiación de días seleccionados para el cuarto ciclo de medición.

D.2. TEMPERATURA DE HOJA

La temperatura de hoja fue cuantificada mediante Porómetro marca Decagon Devices modelo SC-1 (Figura 42) en 3 hojas por especie, totalmente expuestas, en el siguiente rango horario: 10:30 hs, 12:00 hs, 13:30 hs, 15:00 hs y 16:30 hs en días soleados y despejados de la estación de verano. Estas mediciones se repitieron 3 veces, es decir, en tres días distintos de medición. La pinza del porómetro, que incorpora una cámara con un recorrido de difusión conocido, se fija a la superficie de las hojas y a continuación se empieza a medir la presión de vapor entre dos puntos de esta trayectoria, para calcular el flujo y el gradiente con las medidas de presión de vapor y conductancia de difusión conocida (Campbell, 1977; Percy et al., 1989).

Una vez obtenidos los valores de temperatura de hoja, los datos se procesaron comparativamente mediante gráficos de puntos que indican la dispersión y el error estándar de los mismos.



Figura 42: Porómetro marca Decagon Devices modelo SC-1.

D.3. TERMOGRAFÍA DE CUBIERTAS VEGETADAS

La termografía infrarroja es un método no destructivo para determinar el comportamiento térmico superficial (T_s) de un material. La cámara infrarroja proporciona un medio para la medición de temperatura edilicia desde el interior, así como desde el exterior. Por lo tanto, es una valiosa herramienta para detectar defectos en la envolvente, puentes térmicos, infiltraciones de aire y humedad en los edificios (Balaras & Argiriou, 2002; Barreira & De Freitas, 2008; Flores Larsen & Hongn, 2012).

El sistema de exploración termográfica determina la distribución térmica sobre la base de las radiaciones IR emitidas desde una superficie caliente, sin contacto físico entre el equipo de medición y la superficie a analizar. Como resultado, se obtiene una imagen térmica de dos dimensiones, en diferentes tonos de colores o en escala de grises.

Para determinar la temperatura superficial de cada uno de los materiales evaluados se utilizó una cámara infrarroja IR Fluke Ti 55. La cámara infrarroja no mide la temperatura superficial, sino la radiación infrarroja emitida por el objeto estudiado y a través de la Ley de Stefan-Boltzman se calcula la temperatura de los objetos. La energía radiante registrada no sólo depende de la temperatura del objeto, sino que también de su emisividad, es por ello que el valor de emisividad fue fijado acorde a los valores registrados previamente (Grimmond & Oke 2002; Sailor & Hagos, 2011; Morakinyo et al., 2017).

La cámara IR Fluke Ti 55 detecta la radiación infrarroja de onda larga en el rango de 7.5 a 14 μm dentro del espectro electromagnético. Rango de temperaturas (-20 °C a +600 °C). Sensibilidad térmica para apreciar diferencias de temperatura (≤ 0.05 °C).

En concordancia con el criterio expresado por los autores Flores Larsen & Hongn (2012) la temperatura de fondo ingresada a la cámara IR fue calculada según ecuación de temperatura de cielo (T_{sky}). La Temperatura cielo (T_{sky}) es la temperatura del cielo si éste se comportase como un cuerpo negro, que irradia la misma energía hacia la tierra. Según norma de referencia se calcula con la siguiente ecuación:

$$T_{\text{sky}} = 0.0552 \cdot T_a^{1.5} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde; T_a : temperatura de aire (K)

Con este instrumento se obtuvieron imágenes termográficas que registran el calor radiante de cada material. El procesamiento de imágenes se realiza con el software Smart-View 2.1 (Figura 43). En dichas imágenes cada píxel contiene un valor de temperatura determinado. A través de algoritmos, el software asigna un color específico que corresponde a un valor de temperatura en las coordenada x-y de la imagen (Fluke, 2010).

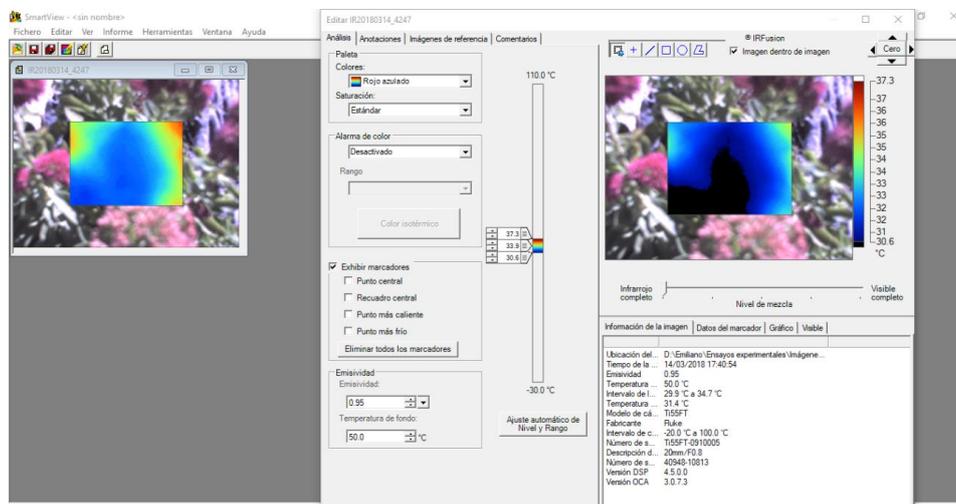


Figura 43: Pantalla del software Smart-View 2.1 para el análisis de imágenes termográficas.

Las cubiertas vegetadas muestran en ocasiones una escasa uniformidad térmica que se debe principalmente a la diferenciación entre planta, geotextil y sustrato. Es por ello, que los valores analizados corresponden al promedio térmico de la cubierta vegetal analizada.

Metodológicamente, se tomaron imágenes termográficas cada dos horas, desde las 9:00 hs hasta las 21:00 hs con el fin de captar todo el periodo de calentamiento diurno y el comienzo del periodo de enfriamiento. Esta práctica se realizó en dos días diferentes asoleados y despejados de la estación de verano. Se tomaron dos fotografías por cubierta a cada hora, se promediaron y ese promedio define la temperatura superficial horaria para cada cubierta vegetada.

D.4. MEDICIÓN DE ALBEDO EN CUBIERTAS VEGETADAS

La medición de esta variable se realizó mediante estudios de campo con instrumentos portátiles, tales como piranómetros y albedómetros según refiere la bibliografía (Reagan & Acklam, 1979; Lapujade, 1994; Parker et al., 1996; Matthias et al., 1999; Matthias et al., 2000).

El método de ensayo de la norma “Standard Test Method for Measuring Solar Reflectance of Horizontal and Low-Sloped Surfaces in the Field” E1918 cubre la medición de la reflectancia solar de diversas superficies y materiales horizontales y de poca pendiente en el campo, utilizando un piranómetro. Se aplica cuando el ángulo del sol respecto a la normal de una superficie es menor que 45° (ASTM E 1918, 2006).

La obtención del albedo aplicando la Norma E-1918 es una metodología costosa, inconveniente y compleja de llevar a la práctica, dado que establece que sólo se puede utilizar cuando la muestra a estudiar posee una superficie mayor a 10 m² con una configuración de área cuadrada o circular. En cambio, el método variante E-1918A mide la reflectancia solar de un material sobre un área de 1 m², mediante el uso de un

piranómetro y un par de máscaras de color blanco y negro (Akbari & Levinson, 2008). Es por ello que en la presente investigación los niveles de albedo de los materiales evaluados fueron registrados con el método variante de la norma E-1918 desarrollado por Akbari, 2008 (en lo sucesivo E-1918 A), disponiendo cada uno de los materiales evaluados de forma que cubran una superficie continua de 1m².

Al utilizar un solo piranómetro para mediciones de albedo resulta económico, sin embargo, introduce incertidumbres adicionales asociadas con la inversión del instrumento (Sailor et al., 2006). Por lo tanto, se optó por utilizar un sistema de dos piranómetros tipo Kipp & Zonen CM3, que en conjunto se denomina albedómetro.

El albedómetro registra la radiación solar recibida sobre la superficie horizontal y la radiación solar reflejada. El albedo de cada material se determina por el cociente de ambas radiaciones con la radiación reflejada como dividendo (Kipp & Zonen, 2012). El espectro de radiación cubierto por el instrumento es 285-2800 nm, y una irradiación solar máxima de 4000 W/m². Su sensibilidad nominal a 1.5*10⁻⁶ V/Wm². El tiempo de respuesta indicado (95%) es 18 segundos.

D.4.1. Método variante NORMA E-1918 A

Este método permite la medición del albedo y de la reflexión difusa de una superficie pequeña. La irradiancia solar (potencia por unidad de área, en lo sucesivo, simplemente "radiación") que incide sobre el sensor de un piranómetro horizontal mirando hacia abajo, es un promedio ponderado de la radiación del sol reflejada por el área del objetivo y la reflejada de sus alrededores.

El método E-1918A determina la reflectancia de un área mediante tres mediciones consecutivas de luz solar reflejada. En la primera configuración, denotado por el subíndice 1 (I₁), el área de estudio está exactamente cubierta por una superficie opaca blanca (en lo sucesivo, "patrón blanco"). En la segunda configuración, denotado por el subíndice 2 (I₂), el área está cubierta por una superficie opaca negra (en lo sucesivo, "patrón negro"). En la tercera configuración, denotado por el subíndice 3 (I₃), el área está descubierta.

Luego la reflectancia de la superficie está determinada a partir de la siguiente ecuación:

$$A_t = A_b + \frac{I_3 - I_2}{I_1 - I_2} (A_w - A_b) \text{ (Ec. 2)}$$

Donde, A_t: reflectancia solar de la superficie objetivo;

A_w: reflectancias solar de la máscara blanca;

A_b: reflectancias solar de la máscara negra medidos bajo la norma ASTM E 903;

I₁, I₂, I₃ son las irradiancias incidentes sobre el sensor del albedómetro en las configuraciones 1, 2 y 3.

Al igual que en la norma ASTM E-1918 se utiliza un brazo de 1.5 m que sostiene el albedómetro sobre el centro de la zona de estudio, a una altura de 0.5 m (Figura 44).

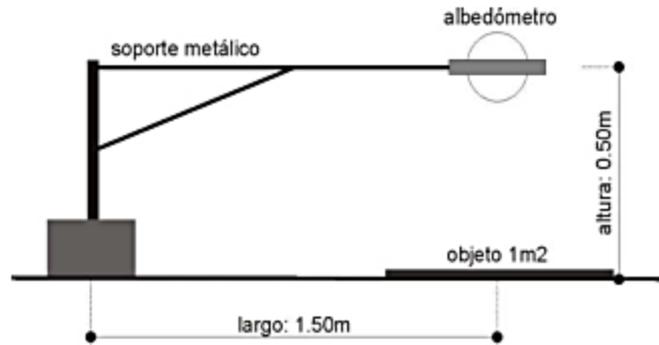


Figura 44: Procedimiento para medir el albedo de materiales (Akbari & Levinson, 2008).

El procedimiento de medición consiste en alinear el soporte, cuidando que no se proyecten sombras por lo menos a 2 m de distancia desde el centro de la zona de destino. El albedómetro debe estar paralelo a la superficie en la que se lleva a cabo la medición. El protocolo de medición indica los siguientes pasos:

1. Centrar el albedómetro sobre el área objetivo.
2. Ocultar el material a relevar con la máscara negra, y sobre ésta colocar la máscara blanca. Tener en cuenta que la superficie blanca debe cubrir exactamente la máscara negra.
3. Sensor arriba, medir la irradiancia solar global horizontal entrante (I_H). Comprobar el valor de radiación entrante con las tablas solares estándar.
4. Sensor abajo, en primer lugar, medir la irradiancia solar reflejada del patrón blanco (I_1). En segundo lugar, medir la radiación solar reflejada del patrón negro (I_2). En tercer lugar, medir la radiación solar reflejada del material (I_3).
5. Sensor arriba, volver a medir la radiación solar entrante (I^*_H). Si $[I^*_H - I_H] > 20 \text{ Wm}^{-2}$ repetir los pasos 2 al 5.
6. Las cinco medidas del albedómetro (I_H , I_1 , I_2 , I_3 , I^*_H) se deben llevar a cabo en un intervalo de tiempo menor a 10 minutos. Entre mediciones se estabiliza el instrumento durante 30 segundos.
7. Calcular la reflectancia solar de la zona evaluada (A_t) utilizando la ecuación 2.
8. Repita los pasos 2 al 7 dos veces más para obtener un total de tres valores de A_t .
9. Si la diferencia de los tres valores de A_t es mayor que 0.02 [es decir, máx. $(A_t) - \min(A_t) > 0.02$], se repite los pasos 2 al 8 (Figura 45).

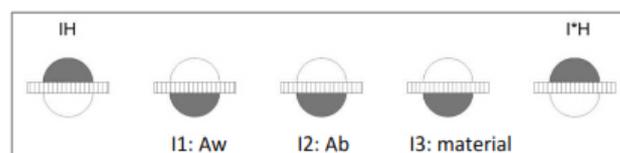


Figura 45: Obtención de irradiancias (I_H ; I^*_H ; I_1 ; I_2 y I_3).

Las mediciones de esta variable con el albedómetro se realizaron en horas del mediodía en la estación de verano, en días soleados y despejados. Se realizaron tres repeticiones y los datos obtenidos se procesaron a través del MÉTODO VARIANTE de la NORMA E-1918 A de Akbari & Levinson (2008) para obtener el albedo por cada cubierta.

I-Resultados de respuesta térmica de cubiertas vegetadas a través de ensayos experimentales

A. TEMPERATURAS DE SUSTRATO, SUPERFICIALES E INTERIORES

Los resultados obtenidos se analizan -para cada ciclo de medición- en forma comparativa para una cubierta tradicional y dos cubiertas vegetadas. Las variables analizadas fueron: temperatura del sustrato, temperatura superficial superior e inferior de la losa y temperatura interior en los box experimentales. Los datos fueron promediados en forma horaria para una mejor comprensión de los comportamientos globales. Las curvas de temperatura interior, exterior e irradiación global total para los cuatro ciclos de medición se encuentran en el Anexo-II de Respuesta térmica.

- Primer ciclo de medición: cubierta vegetada con *Sedum lineare* (CVSl), *Nassella tenuissima* (CVNt) y cubierta tradicional (CT)

El análisis de la Figura 46 muestra que la temperatura de sustrato oscila en un rango de 17.9 a 33.5°C -media 26.4 °C- para la cubierta vegetada con *Sedum lineare* (CVSl), en cambio, con *Nassella tenuissima* (CVNt) la oscilación es menor, con valores entre 19.0 y 31.9 °C -media 26.0 °C-. Si bien la diferencia entre la temperatura media de ambos sustratos es del orden de 0.4 °C, el sustrato de CVNt presenta menor amplitud térmica - 2.7 °C- y menor valor medio que CVSl.

De la Figura 46, se interpreta que las temperaturas medias superficiales en ambas caras de la losa en las cubiertas vegetadas se aproximan a 27 °C, mientras que en la cubierta tradicional la temperatura media superficial inferior es 4 °C mayor que la temperatura media superficial superior. Este fenómeno se debe al tipo de membrana hidrófuga en el box tradicional (igual a la de los box con cubierta vegetada), ya que se comporta como un material frío (en inglés, cool roofs) debido a su composición y acabado y no alcanza temperaturas tan altas como se esperaría en membranas de uso tradicional. A esto último, se suma que la materialidad del revestimiento interior (losa de hormigón armado sin aislar, y paredes y pisos con placas cementicias) es másica y funciona como acumuladora y conservadora de la energía, a lo que se suma la hermeticidad interior de los box experimentales que no facilitan los intercambios convectivos. De todos modos, se observa que la temperatura media superficial superior de la CT es al menos 2 °C más elevada que las temperaturas medias superficiales superiores en las CV.

La temperatura interior en el box con CVSl presenta una media de 28.2 °C -P₉₅=34.8 y P₀₅=20.4-, en el box con CVNt de 27.7 °C -P₉₅=34.0 y P₀₅=20.2- y, en el box con CT de 31.0 °C -P₉₅=42.3 y P₀₅=19.4-. Es decir, las temperaturas medias interiores de los box con cubiertas vegetadas oscilan entre 27.7 y 28.2 °C, mientras que en el box con cubierta tradicional la temperatura media interior es 3 °C mayor y la amplitud térmica 9 °C superior.

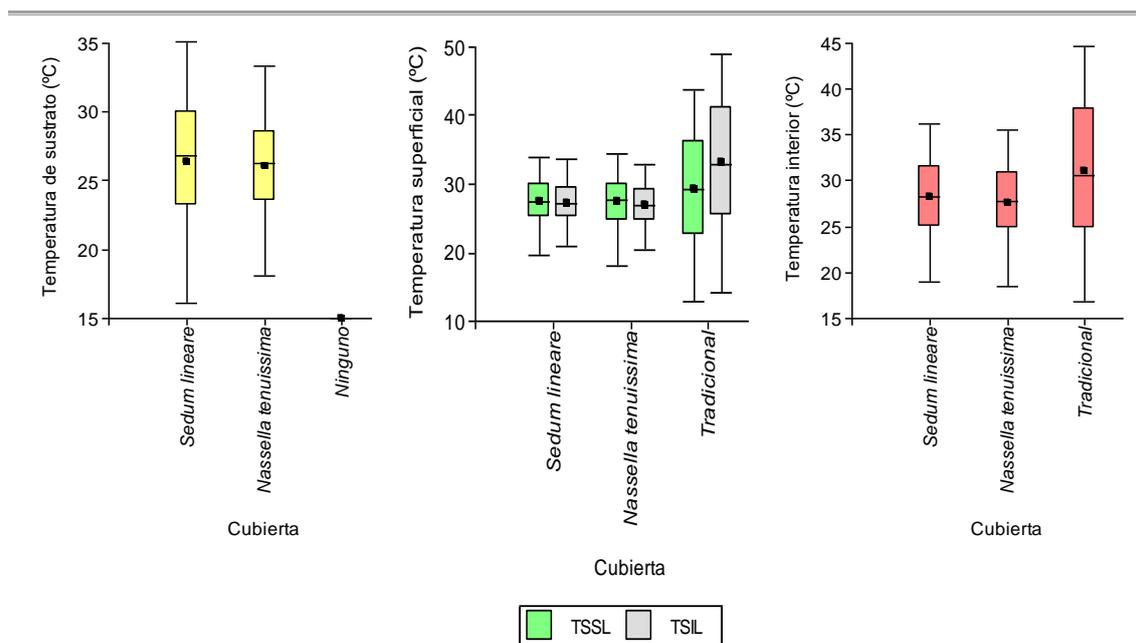


Figura 46: Cubierta vegetada con *Sedum lineare*, *Nassella tenuissima* y cubierta tradicional. T_s =Temperatura de sustrato, TSSL=temperatura superficial superior de la losa, TSIL=temperatura superficial inferior de la losa y T_I =temperatura de aire interior

- **Segundo ciclo de medición: cubierta vegetada con *Aptenia cordifolia* (CVAc), *Sedum spectabile* (CVSe) y cubierta tradicional (CT)**

El análisis de la Figura 47 muestra que la temperatura del sustrato oscila en un rango de 25.4 a 35.2°C -media 30.2 °C- para la cubierta con *Aptenia cordifolia* (CVAc) mientras que en la cubierta con *Sedum spectabile* (CVSe) la oscilación es levemente mayor con valores que van de 26.3 a 36.7 °C -media 31.4 °C-. Por lo tanto, si bien la diferencia entre la temperatura media de ambos sustratos es del orden de 1.2 °C, la amplitud térmica del sustrato en la CVAc es 0.5 °C inferior respecto a la CVSe.

De la Figura 47, se desprende que las temperaturas superficiales en la cara superior de la losa en los casos con cubiertas vegetadas presentan diferencias del orden de 0.7 °C respecto a la temperatura superficial de la cara inferior de la losa. Para el caso con cubierta tradicional, la temperatura superficial superior es de menor magnitud que la inferior y con una diferencia del orden de 4 °C, del mismo modo que se explicó en el primer ciclo de medición. Esto indica que las cubiertas vegetadas atemperan las temperaturas exteriores mientras que la cubierta tradicional, sin aislar, potencia el efecto de la temperatura exterior. Este fenómeno se verifica también en el primer ciclo de medición, aunque con menor intensidad en el caso de las cubiertas vegetadas con *Sedum lineare* (CVSl) y *Nassella tenuissima* (CVNt).

La temperatura interior en el box con CVAc presenta una media de 31.0 °C - $P_{95}=35.5$ y $P_{05}=26.8$ -, con CVSe de 30.8 °C - $P_{95}=35.1$ y $P_{05}=26.5$ - y el box con cubierta tradicional de 33.1 °C - $P_{95}=42.5$ y $P_{05}=24.4$ -. Esto implica que la temperatura media interior en los box con cubiertas vegetadas son del mismo orden mientras que en el caso de la cubierta tradicional la temperatura es 2 °C más elevada y la amplitud térmica significativamente superior ($\Delta T_{\text{cubierta tradicional}}=18$ °C versus $\Delta T_{\text{cubiertas vegetadas}}=11$ °C).

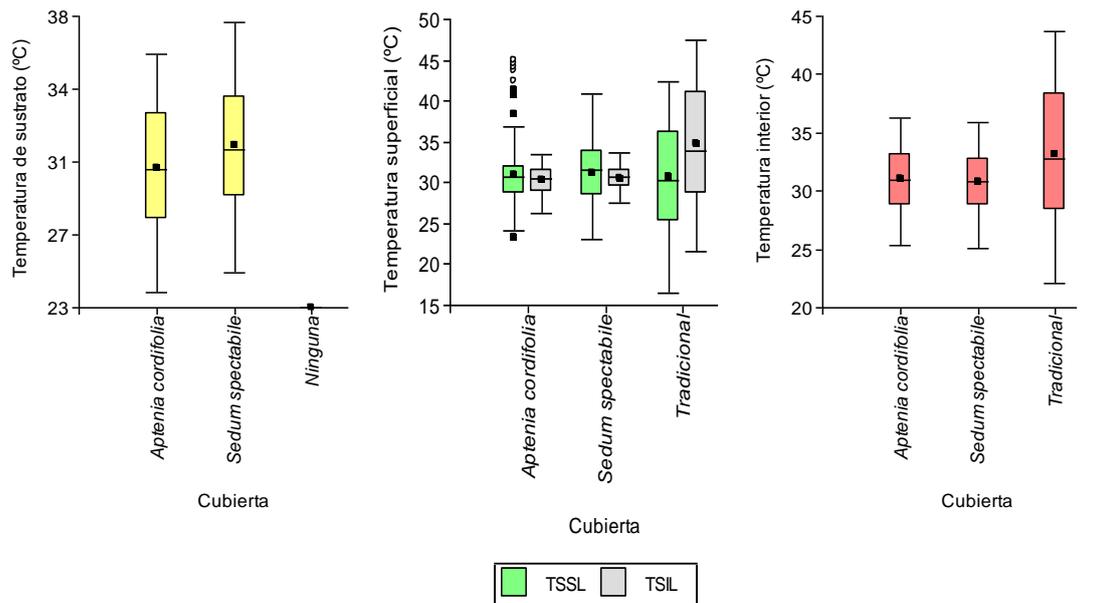


Figura 47: Ciclo de medición: cubierta vegetada con *Aptenia cordifolia*, *Sedum spectabile* y cubierta tradicional. Ts=Temperatura de sustrato, TSSL=temperatura superficial superior de la losa, TSL=temperatura superficial inferior de la losa y TI=temperatura de aire interior

- **Tercer ciclo de medición: cubierta vegetada con *Hyalis argentea* (CVHa), *Cynodon dactylon* (CVCd) y cubierta tradicional (CT)**

El análisis de la Figura 48 muestra que la temperatura del sustrato oscila en un rango de 22.8 a 34.5 °C -media 28.5 °C- para la cubierta con *Cynodon dactylon* (CVCd) mientras que en la cubierta con *Hyalis argentea* (CVHa) la oscilación es menor con valores que van de 24.2 a 30.8 °C -media 27.8 °C-. Por lo tanto, si bien la diferencia entre la temperatura media de ambos sustratos es del orden de 0.7 °C, la amplitud térmica del sustrato en la CVHa es 5.1 °C inferior respecto a la CVCd, lo cual demuestra una mejor performance térmica del primero.

De la Figura 48, se desprende que las temperaturas superficiales en la cara superior de la losa en los casos con cubiertas vegetadas presentan diferencias del orden de 1.22 °C respecto a la temperatura superficial de la cara inferior de la losa para CVCd, en cambio para CVHa, esta diferencia es de -0.28 °C. Esto último, evidencia un menor flujo de calor debido a una menor diferencia de temperatura, incluso invertidas (TSL mayor que TSSL) respecto a CVCd. Para el caso con cubierta tradicional, la temperatura superficial superior es de menor magnitud que la inferior y con una diferencia del orden de 3.3 °C, del mismo modo que se explicó en el primer y segundo ciclo de medición. Esto indica que las cubiertas vegetadas atemperan las temperaturas exteriores mientras que la cubierta tradicional, sin aislar, potencia el efecto de la temperatura exterior. Este fenómeno se verifica también en el primer y segundo ciclo de medición, aunque con menor intensidad en estos casos. Además, en este ciclo se evidencia mayor diferencia entre cubiertas vegetadas, respecto al primer y segundo ciclo.

La temperatura interior en el box con CVCd presenta una media de 29.9 °C -P₉₅=34.5 y P₀₅=25.0-, con CVHa de 29.7 °C -P₉₅=33.9 y P₀₅=24.6- y el box con cubierta tradicional de 32.0 °C -P₉₅=41.9 y P₀₅=22.4-. Esto implica que la temperatura media

interior en los box con cubiertas vegetadas son del mismo orden mientras que en el caso de la cubierta tradicional la temperatura es 2 °C más elevada y la amplitud térmica significativamente superior ($\Delta T_{\text{cubierta tradicional}}=19.5$ °C versus $\Delta T_{\text{cubiertas vegetadas}} 9.5$ °C).

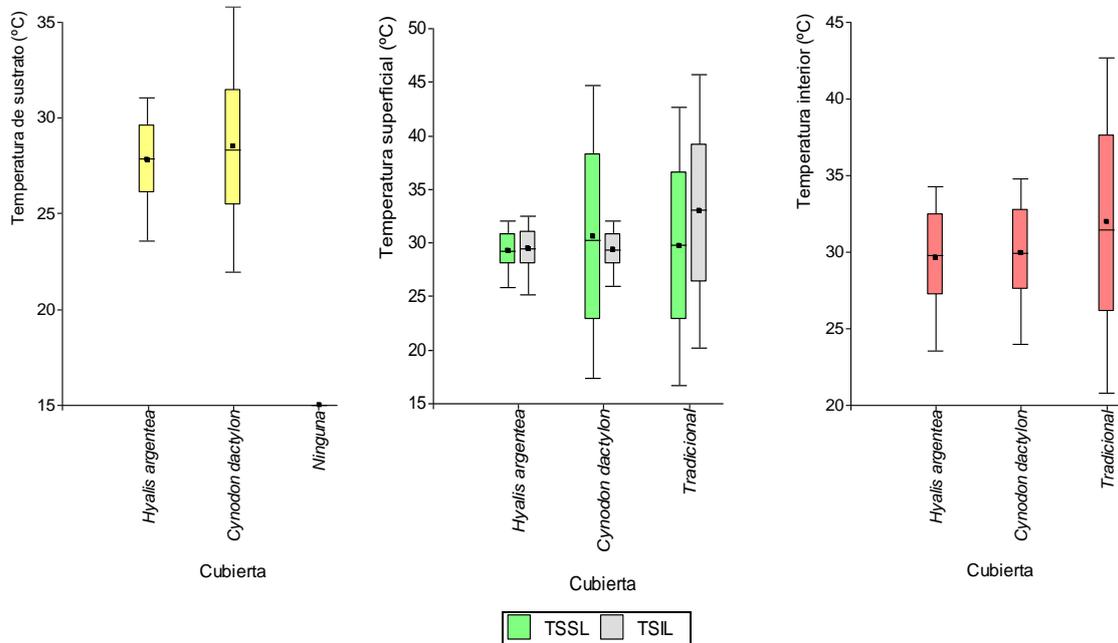


Figura 48: Cubierta vegetada con *Hyalis argentea*, *Cynodon dactylon* y cubierta tradicional. T_s =Temperatura de sustrato, T_{SSL} =temperatura superficial superior de la losa, T_{SIL} =temperatura superficial inferior de la losa y T_I =temperatura de aire interior

- **Cuarto ciclo de medición: cubierta vegetada con *Aptenia cordifolia* (CVAc), *Cynodon dactylon* (CVCd) y cubierta tradicional (CT)**

El análisis de la Figura 49 muestra que la temperatura del sustrato oscila en un rango de 17.7 a 28.1 °C -media 23.3 °C- para la cubierta con *Cynodon dactylon* (CVCd) mientras que en la cubierta con *Aptenia cordifolia* (CVAc) la oscilación es menor con valores que van de 18.8 a 26.6 °C -media 22.9 °C-. Por lo tanto, si bien la diferencia entre la temperatura media de ambos sustratos es del orden de 0.4 °C, la amplitud térmica del sustrato en la CVAc es 2.6 °C inferior respecto a la CVCd, lo cual demuestra una mejor performance térmica del primero.

De la Figura 49, se desprende que las temperaturas superficiales en la cara superior de la losa en los casos con cubiertas vegetadas presentan diferencias del orden de 0.5 a 0.8 °C respecto a la temperatura superficial de la cara inferior de la losa, para CVAc y CVCd, respectivamente. Para el caso con cubierta tradicional, la temperatura superficial superior de losa no se ha cuantificado debido a una falla en la termocupla colocada para medirla. Se puede observar que la temperatura superficial inferior de la losa con cubierta tradicional, se encuentra al menos 4.7 °C por encima de esas temperaturas en los casos con cubierta vegetada.

La temperatura interior en el box con CVCd presenta una media de 23.9 °C - $P_{95}=28.4$ y $P_{05}=18.6$ - , con CVAc de 23.8 °C - $P_{95}=28.2$ y $P_{05}=18.8$ - y el box con cubierta

tradicional de 26.2 °C - $P_{95}=35.5$ y $P_{05}=17.9$ -. Esto implica que la temperatura media interior en los box con cubiertas vegetadas son del mismo orden mientras que en el caso de la cubierta tradicional la temperatura es 2 °C más elevada y la amplitud térmica significativamente superior ($\Delta T_{\text{cubierta tradicional}}=17.6$ °C versus $\Delta T_{\text{cubiertas vegetadas}} 9.5$ °C).

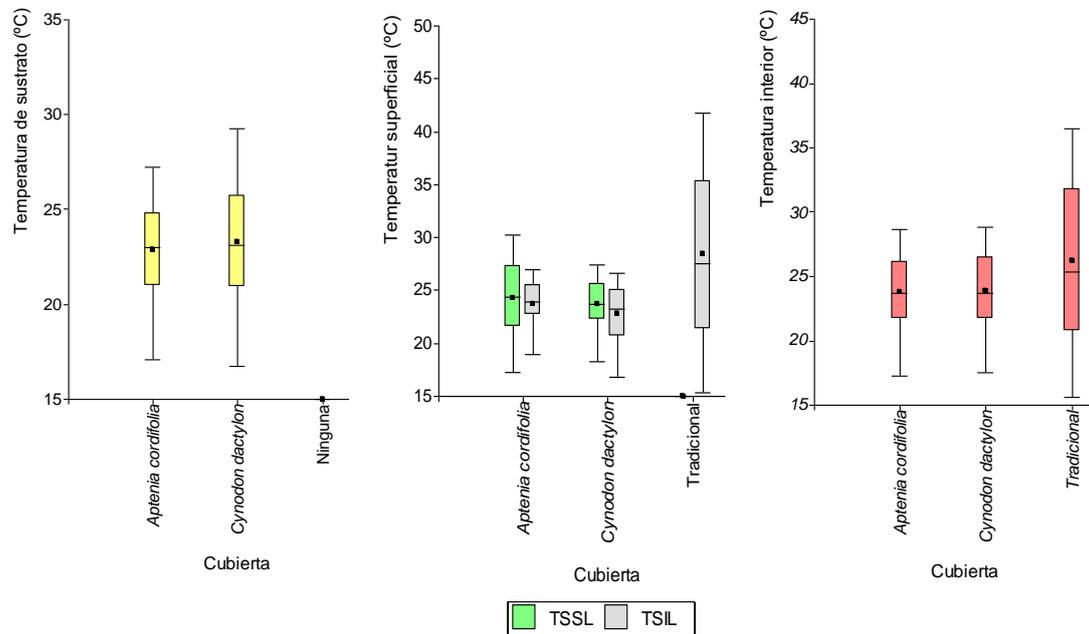


Figura 49: Cubierta vegetada con *Aptenia cordifolia*, *Cynodon dactylon* y cubierta tradicional. T_s =Temperatura de sustrato, T_{SSL} =temperatura superficial superior de la losa, T_{SIL} =temperatura superficial inferior de la losa y T_I =temperatura de aire interior

A.1. Análisis comparativo de las diferencias de temperatura interior entre cubierta tradicional y cubiertas vegetadas.

A los fines de identificar el efecto de cubiertas vegetadas con distintas especies propuestas internacionalmente, con respecto a otras adaptadas regionalmente, se compara la diferencia de temperatura interior entre el box con cubierta tradicional y los box con cubiertas vegetadas, en cuatro ciclos de medición.

La Figura 50 muestra que el box con cubierta tradicional presenta temperaturas interiores más elevadas que los box con cubiertas vegetadas durante el día y menores durante la noche. Estas diferencias oscilan entre 7 °C y 10 °C durante el día y, entre 2 °C y 3 °C durante la noche. Por ejemplo, se observa en el primer día de medición, a las 6 p.m., que la cubierta vegetada con *Nassella tenuissima* (CVNt) se encuentra 10.3 °C más fresca que la cubierta tradicional y a las 8 a.m., 2 °C más caliente. Esto indicaría que la cubierta más eficiente durante el día es la que presenta mayores diferencias de temperatura interior. Mientras que, durante la noche, la más eficiente es la que presenta menor diferencia de temperatura respecto a la temperatura interior del box con cubierta tradicional.

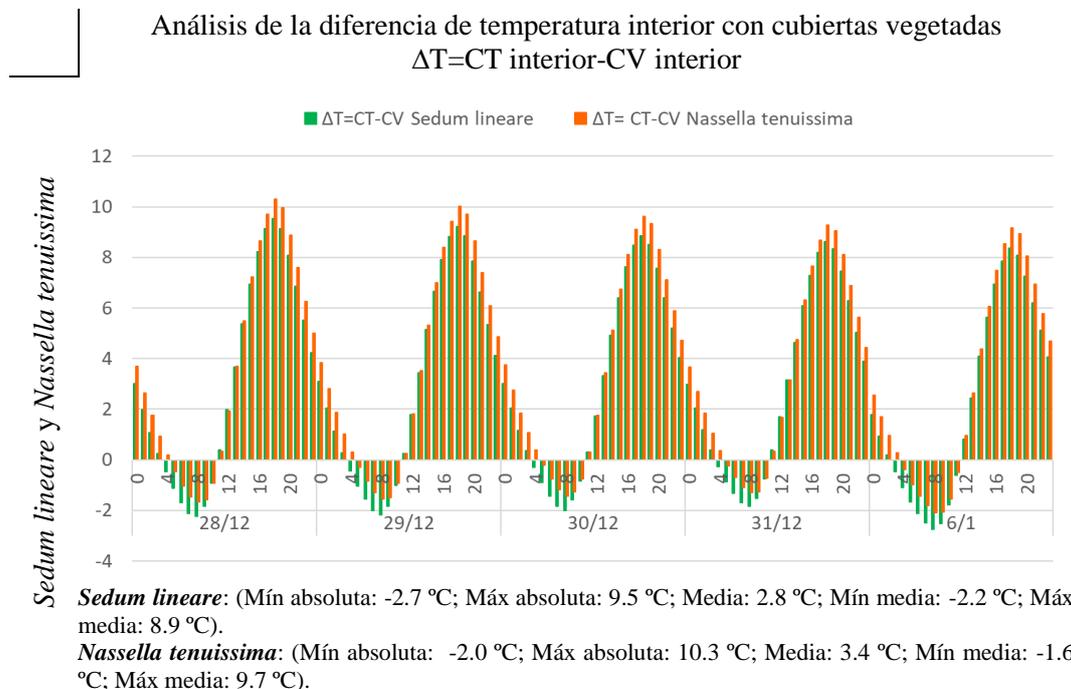
Respecto a las cubiertas vegetadas cuando se analizan los cuatro ciclos de medición, se observan diferencias en el comportamiento térmico del espacio interior asociados al hábito de crecimiento de la especie. Los box con cubiertas vegetadas con especies erguidas -*Nassella tenuissima*, *Sedum spectabile*, *Hyalis argentea*- muestran mayores

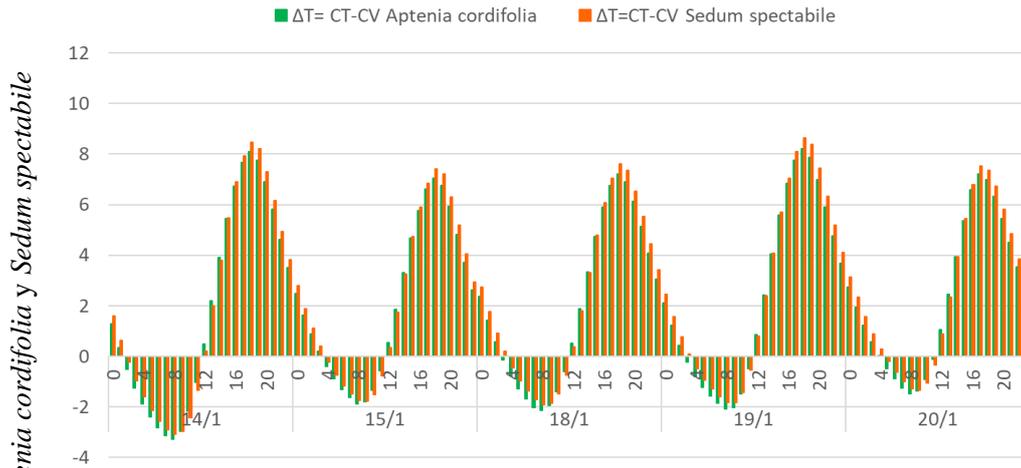
diferencias de temperatura durante el día en comparación al box con cubierta tradicional que los box con especies rastreras -*Aptenia cordifolia*, *Sedum lineare*, *Cynodon dactylon*- y, menores diferencias durante la noche generando un efecto positivo a lo largo de todo el día. Este comportamiento podría explicarse por el hábito de crecimiento de las especies erguidas que contribuyen a disminuir la transferencia de calor debido al sombreado del sustrato y posibilitan la circulación de aire entre el follaje y el sustrato. Esta condición favorece la capacidad aislante de la cubierta durante el día y permite mejores condiciones de enfriamiento durante la noche.

Al comparar dos especies rastreras -*Aptenia cordifolia*, *Cynodon dactylon*-se observa que durante el día la especie carnosa *Aptenia cordifolia* tiene mejores aptitudes térmicas que la especie cespitosa *Cynodon dactylon*, pero durante la noche las diferencias entre ambas son mínimas.

El box con *Nassella tenuissima* presenta mayor diferencia media de temperatura interior respecto al box con cubierta tradicional. Dicha diferencia media es del orden de 3.4 °C, siendo la diferencia máxima absoluta de 10.3 °C y la máxima media de 9.7 °C. Por lo tanto, esta especie nativa es la que muestra mayor capacidad para amortiguar las temperaturas exteriores durante el día y es la que resulta menos conservativa durante las horas de la noche, ya que presenta menores temperaturas mínimas interiores. Por lo que las diferencias de temperatura con el box de cubierta tradicional son menores durante la noche (Figura 50).

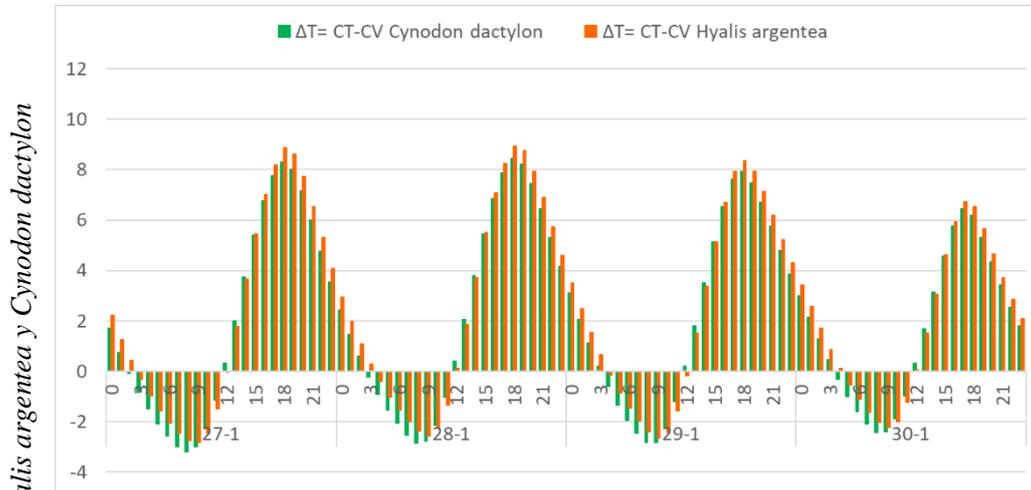
Respecto al *Sedum lineare* -especie recomendada en la literatura internacional y hábito de crecimiento rastrero- muestra diferencias medias de temperatura interior respecto al box con cubierta tradicional de 2.8 °C, siendo la diferencia máxima absoluta de 9.5 °C y la máxima media de 8.9 °C.





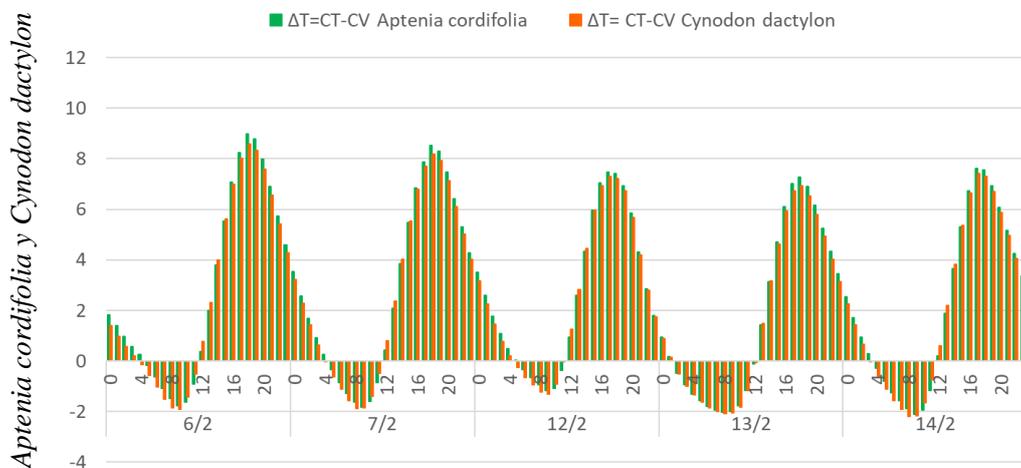
Aptenia cordifolia: (Mín absoluta: -3.3 °C; Máx absoluta: 8.2 °C; Media: 2.1 °C; Mín media: -2.2 °C; Máx media: 7.5 °C).

Sedum spectabile: (Mín absoluta: -3.1 °C; Máx absoluta: 8.6 °C; Media: 2.3 °C; Mín media: -2.0 °C; Máx media: 7.9 °C).



Cynodon dactylon: (Mín absoluta: -3.2 °C; Máx absoluta: 8.4 °C; Media: 2.0 °C; Mín media: -2.8 °C; Máx media: 7.8 °C).

Hyalis argentea: (Mín absoluta: -2.8 °C; Máx absoluta: 8.9 °C; Media: 2.3 °C; Mín media: -2.6 °C; Máx media: 8.2 °C).



Aptenia cordifolia: (Mín absoluta: -2.1 °C; Máx absoluta: 9.0 °C; Media: 2.4 °C; Mín media: -1.8 °C; Máx media: 8.0 °C).

Cynodon dactylon: (Mín absoluta: -2.2 °C; Máx absoluta: 8.6 °C; Media: 2.3 °C; Mín media: -1.9 °C; Máx media: 7.7 °C).

Figura 50: Diferencias de temperatura entre el aire interior del box testigo y el aire interior de los box con cubiertas vegetadas para los cuatro ciclos de medición.

A.2. Análisis comparativo de las diferencias de temperatura exterior y la temperatura del sustrato.

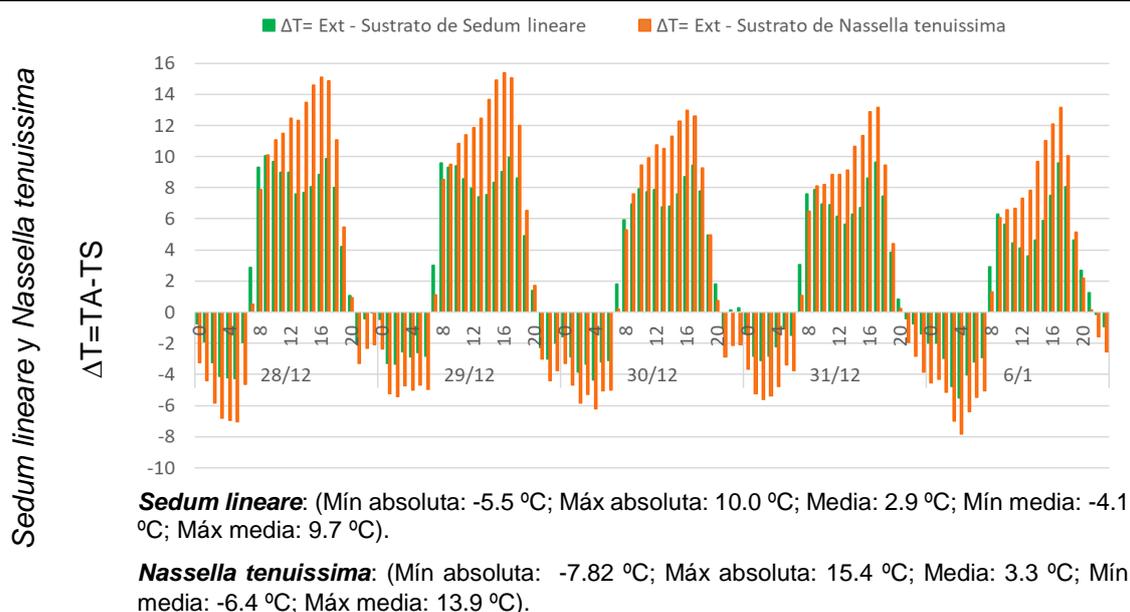
El siguiente análisis persigue identificar si el efecto de atenuación de la temperatura exterior guarda relación con las características del sustrato en las cubiertas vegetadas, reflejando la capacidad del paquete biológico para regular el flujo de calor hacia el espacio interior -periodo de calentamiento- o hacia el exterior - periodo de enfriamiento-. La Figura 51 muestra que los sustratos de las especies nativas *Nassella tenuissima* y *Hyalis argentea* presentan mayores diferencias de temperatura respecto a la temperatura del aire exterior tanto durante el día como durante la noche. Alcanzan diferencias máximas absolutas de 15.4 °C y 13.3 °C; máxima media de 13.9 °C y 12.0 °C; y media de 3.3 °C y 1.7 °C; respectivamente. El sustrato presenta temperaturas significativamente más bajas que la temperatura exterior durante el día y, más elevadas durante la noche (Δ Mín absoluta: -7.82 °C CVNt; -8.4 °C CVHa; Δ Mín media: -6.4 °C CVNt; -7.9 °C CVHa). Esta condición térmica muestra, durante el día, una mayor inercia térmica del sustrato de *Nassella tenuissima* y de *Hyalis argentea* respecto al resto de las especies en estudio. La inercia térmica se relaciona a la densidad, la conductividad térmica y el calor específico que caracteriza a cada sustrato. Si se observa el contenido de agua (CAS) de todos los sustratos, se verifica que el de *Nassella tenuissima* presenta el mayor contenido de agua incrementando su calor específico. Es decir, su capacidad de acumulación. Durante la noche, el hábito erguido de la especie favorece el enfriamiento radiativo y convectivo del sustrato. Este comportamiento se verifica también para *Sedum spectabile* y para *Hyalis argentea*.

El sustrato del *Sedum lineare*, muestra un comportamiento inverso: menos conservativo durante el día (Δ Máx absoluta: 10.0 °C, Δ Máx media: 9.7 °C) y mayor inercia durante la noche (Δ Mín absoluta: -5.5 °C, Δ Mín media: -4.1 °C). Al igual que *Cynodon dactylon* en el tercer ciclo de medición (Δ Máx absoluta: 9.1 °C, Δ Máx media: 7.9 °C, Δ Mín absoluta: -6.2 °C, Δ Mín media: -6.5 °C). El sustrato de *Sedum lineare* muestra menor CAS y menor capacidad de enfriamiento radiativo y convectivo nocturno asociado al hábito rastrero de la especie. En cambio, *Cynodon dactylon*, en el tercer ciclo de medición contiene más cantidad de agua en el sustrato que *Hyalis argentea*, pero se comporta de la misma forma mencionada para *Sedum lineare*. Probablemente, esto se deba a la mata densa que forma *Cynodon dactylon* que podría dificultar el enfriamiento a través de intercambios de aire del tipo convectivos. Al comparar dos especies rastreras, en el cuarto ciclo de medición, se observa que durante el día tienen comportamiento similar, pero durante la noche *Aptenia cordifolia* (Δ Mín absoluta: -6.6 °C, Δ Mín media: -5.4 °C) se desempeña mejor que *Cynodon dactylon* (Δ Mín absoluta: -7.9 °C, Δ Mín media: -6.0 °C).

La evapotranspiración de las especies vegetales es el fenómeno que ocurre en el sistema planta-agua-suelo y como resultado determina el contenido de agua en la planta y en el sustrato. Se observa en la Figura 51 que *Nassella tenuissima*, *Sedum spectabile* y *Hyalis argentea* -especies de hábito erguido- presentan mayor contenido medio de humedad en el sustrato, debido probablemente a la disminución de la evaporación por la menor ganancia solar directa y el aumento de la rugosidad que opone resistencia al intercambio de aire.

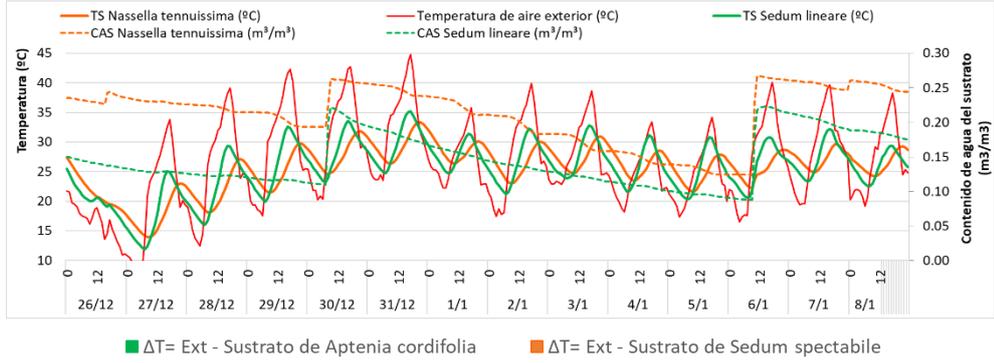
El sustrato de *Sedum spectabile* presenta contenido de agua superior a $0.14 \text{ m}^3/\text{m}^3$, el cual en ocasiones crece debido al agua aportada por riego. Por lo tanto, el sustrato de esta especie se observa conservativo en términos de humedad (CAS promedio= $0.16 \text{ m}^3/\text{m}^3$). El sustrato de *Nassella tenuissima* presenta el mayor contenido hídrico medio ($0.22 \text{ m}^3/\text{m}^3$). Esto se debe a su condición de especie nativa -adaptada a las condiciones climáticas locales- y de crecimiento en un suelo de bajo contenido de materia orgánica, opuesto al sustrato utilizado en la experimentación. *Aptenia cordifolia* presenta un contenido hídrico bajo ($0.09 \text{ m}^3/\text{m}^3$), lo que evidencia que es una especie que para subsistir al contexto ambiental árido podría conservar agua en su vástago en comparación a *Sedum lineare* que es de similar hábito, pero mantiene mayor contenido de agua en el sustrato ($0.15 \text{ m}^3/\text{m}^3$). El sustrato de *Hyalis argentea* presenta un contenido hídrico medio ($0.13 \text{ m}^3/\text{m}^3$), superior a *Cynodon dactylon* en ese mismo ciclo ($0.11 \text{ m}^3/\text{m}^3$). Probablemente, esa diferencia entre contenidos de agua del sustrato en función de hábitos de crecimiento, sea menos notoria que en el primer ciclo debido a que *Hyalis argentea* es también un especie nativa -adaptada a las condiciones climáticas locales-, pero utiliza totalmente los recursos con los que dispone, entre ellos el agua. Es decir, puede resistir bajos contenidos de agua del sustrato, pero si dispone de más cantidad, la planta la aprovecha para su metabolismo. Se verifica entonces que el mayor contenido de agua lo presentan las especies de hábito erguido, probablemente debido al mayor sombreadamiento que generan en el sustrato, lo que disminuiría la evaporación.

Análisis de la diferencia de temperatura y humedad del sustrato

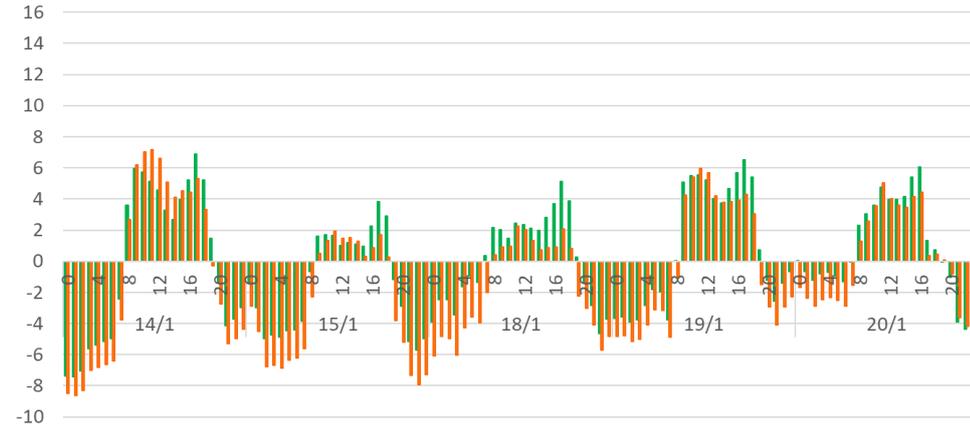


Aptenia cordifolia y Sedum spectabile

TS y CAS



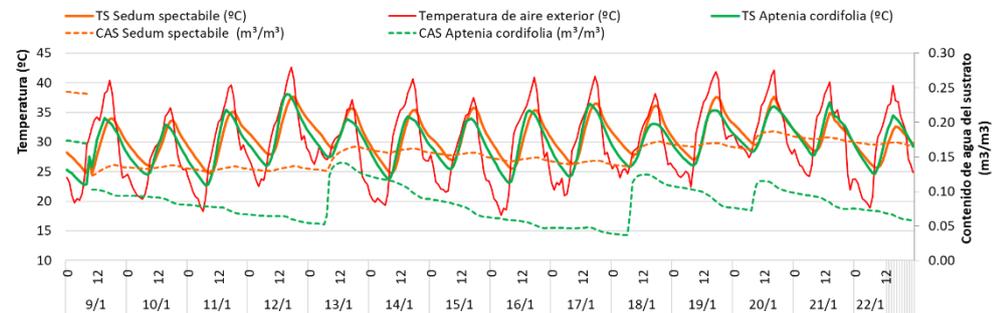
$\Delta T = T_A - T_S$



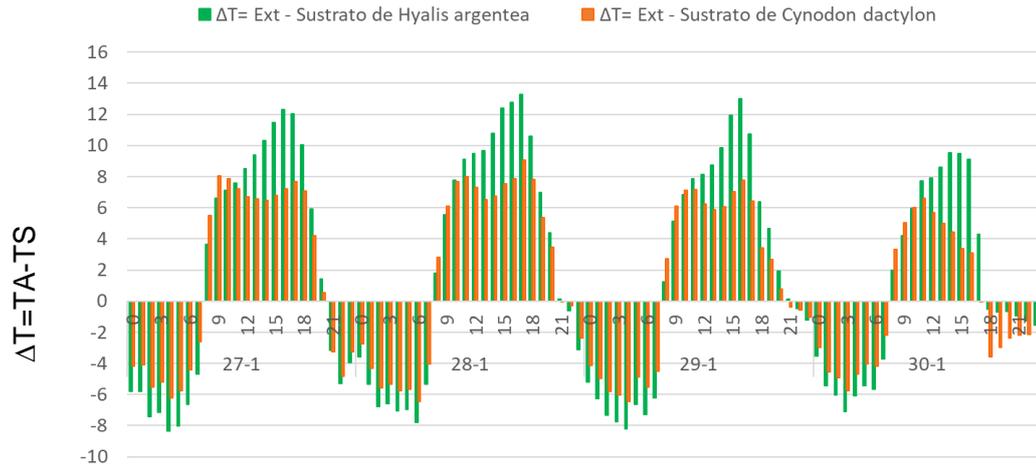
Aptenia cordifolia: (Mín absoluta: -7.4 °C; Máx absoluta: 6.9 °C; Media: 0.0 °C; Mín media: -5.2 °C; Máx media: 5.7 °C).

Sedum spectabile: (Mín absoluta: -8.6 °C; Máx absoluta: 7.2 °C; Media: -1.1 °C; Mín media: -6.4 °C; Máx media: 4.5 °C).

TS y CAS

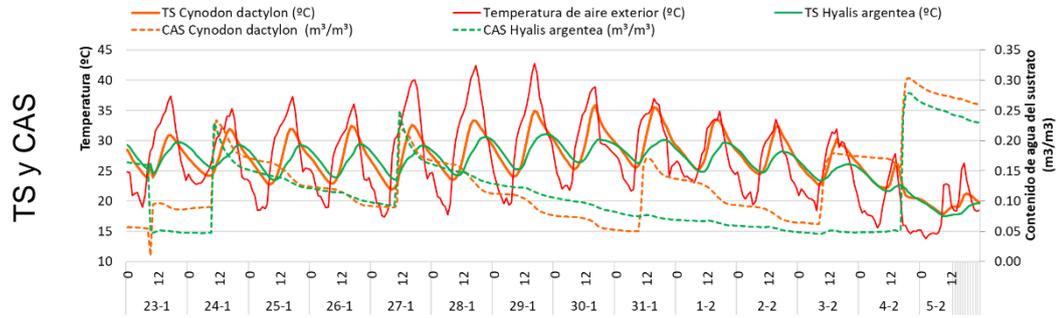


Hyalis argentea y Cynodon dactylon

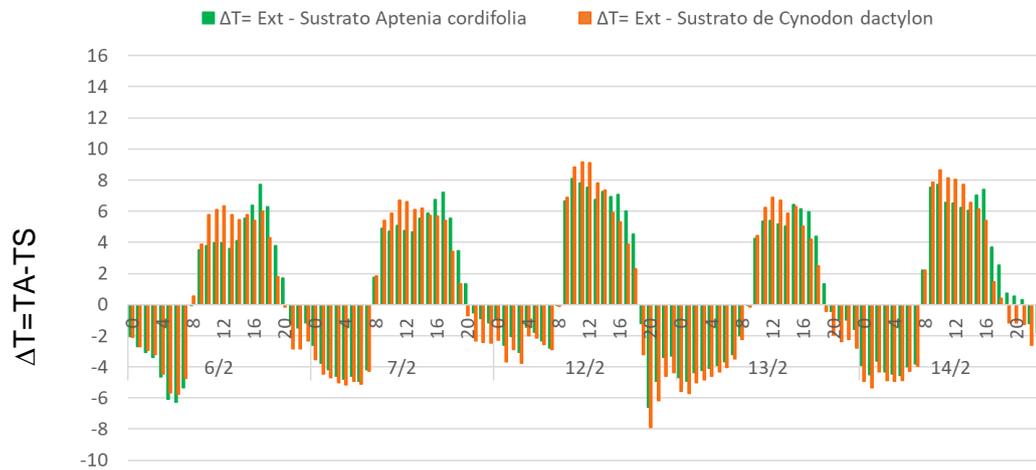


Hyalis argentea: (Mín absoluta: -8.4 °C; Máx absoluta: 13.3 °C; Media: 1.7 °C; Mín media: -7.9 °C; Máx media: 12.0 °C).

Cynodon dactylon: (Mín absoluta: -6.5 °C; Máx absoluta: 9.1 °C; Media: 1.0 °C; Mín media: -6.2 °C; Máx media: 7.9 °C).



Aptenia cordifolia y Cynodon dactylon



Aptenia cordifolia: (Mín absoluta: -6.6 °C; Máx absoluta: 8.1 °C; Media: 0.9 °C; Mín media: -5.4 °C; Máx media: 7.4 °C).

Cynodon dactylon: (Mín absoluta: -7.9 °C; Máx absoluta: 9.2 °C; Media: 0.5 °C; Mín media: -6.0 °C; Máx media: 7.5 °C).

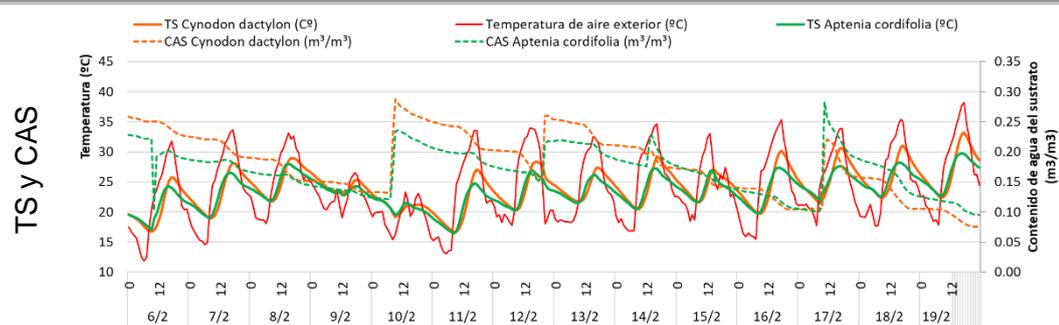


Figura 51: Temperatura de aire exterior, de sustrato y contenido de agua de sustrato para los cuatro ciclos de medición. $\Delta T = TA - TS$ para los días seleccionados.

A.3. Análisis de correlación de variables (Tabla 15, Tabla 16, Tabla 17, Tabla 18)

Se realizó un análisis estadístico con el objeto de conocer la relación entre las variables evaluadas y su peso en la ocurrencia de un determinado fenómeno.

Las variables correlacionadas fueron: Temperatura del sustrato (Ts), Contenido de agua del sustrato (CAS), Temperatura superficial inferior de la losa (TSIL), Temperatura superficial superior de la losa (TSSL), Temperatura del aire interior (TI), Temperatura del aire exterior (TA), Radiación (R) y Velocidad de viento (V).

Variables del contexto ambiental. La temperatura del aire exterior (TA) presenta un elevado coeficiente de correlación de Pearson con respecto a la radiación (R) -0.68, 0.72, 0.71 y 0.75-. De acuerdo a las Tabla 15, Tabla 16 y Tabla 17, la velocidad de viento (V) no se correlaciona con la temperatura del aire exterior (TA) ni con la radiación (R), probablemente porque la variable responda mayoritariamente a fenómenos advectivos u otros y no a fenómenos de convección natural resultantes del efecto de la radiación solar. En cambio, para el ciclo correspondiente a las Tabla 18, se correlaciona la velocidad de viento (V) con la temperatura de aire (TA), debido a que fue un periodo con mayor velocidad de viento y menor temperatura por el momento del año, en comparación con los otros tres ciclos, lo que podría haber colaborado con la convección natural y junto a ello, con su influencia en la determinación de la temperatura del aire en los ensayos experimentales.

Box con cubierta tradicional. Se observa que las variables que determinan la temperatura interior son la temperatura del aire exterior (TA) y las temperaturas superficiales (TSIL, TSSL). Los coeficientes de correlación para la temperatura interior en función de la exterior son de 0.63, 0.51, 0.55 y 0.54, demostrando dependencia del contexto ambiental. Estos valores expresan que hay otras variables que condicionan la temperatura interior. La losa tradicional es un elemento másico y conductor que juega un rol importante en la determinación de la performance térmica interior. Esto se refleja en la correlación de la temperatura superficial de la losa en la cara interior (TSIL) -0.97, 0.97, 0.97 y 0.94- con la temperatura interior. Respecto a la temperatura superficial de la losa en la cara superior (TSSL) los niveles de correlación son menores -0.65, 0.55 y 0.60- debido a que la cara superior se encuentra expuesta a la radiación solar y a la acción del viento (en el cuarto ciclo por fallas en la termocupla no se cuantificó TSSL). La temperatura superficial de la membrana en la losa muestra alta dependencia de la temperatura exterior -0.98, 0.89 y 0.99- y de la radiación solar -0.75, 0.76 y 0.72-. Sumado a esto, la membrana hidrófuga

de la cubierta tradicional se comporta como un material selectivo frío y su alta reflectividad disminuye su temperatura superficial reduciendo la transmitancia térmica.

Box con cubiertas vegetadas. Las variables que determinan la temperatura interior en los box evaluados con las cuatro especies son: la temperatura del sustrato (Ts) con valores de correlación en un rango de 0.85 a 0.96 y, las temperaturas superficiales (TSIL, TSSL) en un rango de 0.53 a 0.99. En los casos de *Sedum lineare*, *Nassella tenuissima*, *Hyalis argentea* y *Aptenia cordifolia* en el cuarto ciclo, la temperatura interior también correlaciona con la temperatura del aire (TA) aunque en menor grado -CVSI: 0.56, CVNt: 0.59; CVHa:0.50 y CVAc:0.51-. Y en el caso de *Sedum spectabile* y de *Aptenia cordifolia* en el cuarto ciclo de medición también correlacionan con el contenido de agua del sustrato (CAS: 0.54 y -0.56). Las especies evaluadas en el tercer ciclo de medición -*Cynodon dactylon* y *Hyalis argentea*- presentan correlación entre la temperatura interior y la velocidad de viento (0.54 y 0.57).

Estos resultados indicarían que la variable de mayor influencia y posibilidades de manipulación en la determinación de la temperatura interior de un espacio con cubierta vegetada es la temperatura del sustrato y las temperaturas superficiales de la losa.

Respecto a la temperatura del sustrato, depende en mayor medida de la temperatura del aire exterior en el caso de las cubiertas con *Sedum lineare*, *Aptenia cordifolia* y *Cynodon dactylon* -CVSI: 0.83; CVAc: 0.74; CVCd: 0.72 en el tercer ciclo; CVAp: 0.78 en el cuarto ciclo- mientras que para las cubiertas con *Sedum spectabile* y *Cynodon dactylon* en el cuarto ciclo, la correlación es menor -CVSe: 0.64; CVCd: 0.62-. Estos resultados permiten inferir que el hábito de crecimiento de la planta -rastrero o erguido- determina la influencia de las condiciones exteriores sobre la temperatura del sustrato. La condición erguida muestra un impacto positivo en la condición térmica del espacio interior. La temperatura del sustrato de las especies rastreras *Cynodon dactylon* del tercer ciclo y *Aptenia cordifolia* del cuarto ciclo, correlacionan positivamente con la velocidad de viento -0.73 y 0.57-, lo cual demuestra la influencia de las condiciones exteriores en la determinación de la temperatura de sustrato.

En relación a las temperaturas superficiales de la losa se observa que correlacionan fuertemente no sólo con la temperatura del espacio interior sino también con la temperatura del sustrato en un rango de 0.51 a 0.97. Esto evidencia la influencia de la tecnología de la cubierta y la importancia de su adecuada combinación con las características propias de las especies y del sustrato, para un desempeño energético apropiado.

Por otra parte, la temperatura del sustrato (Ts) se correlaciona levemente con su contenido de agua (CAS) en el caso de las cubiertas vegetadas con *Sedum lineare* y *Sedum spectabile* -CVSI: 0.54, CVSe: 0.47-. Esto permitiría inferir que el contenido de agua del sustrato, variable de impacto en su temperatura, guarda relación en este caso, con el género de la planta. Por otro lado, la especie *Cynodon dactylon* en el cuarto ciclo de medición, presenta correlación negativa entre la temperatura de sustrato (Ts) con el contenido de agua del mismo (CAS) con un coeficiente de -0.55.

Treatment = Sedum lineare_green roof

Pearson correlation: Coefficients \ probabilities

	Ts	CAS	TSIL	TSSL	TI	TA	R	V
Ts	1.00	2.9E-10	0.00	0.00	0.00	0.00	3.1E-05	0.07
CAS	0.54	1.00	1.2E-05	6.6E-07	2.0E-08	1.4E-08	2.6E-03	0.82
TSIL	0.66	0.39	1.00	0.00	0.00	0.01	2.7E-04	0.35
TSSL	0.73	0.44	0.98	1.00	0.00	5.7E-04	1.1E-03	0.74
TI	0.89	0.49	0.88	0.93	1.00	4.1E-11	0.47	0.16
TA	0.83	0.49	0.25	0.31	0.56	1.00	0.00	0.09
R	0.37	0.27	-0.33	-0.29	-0.07	0.72	1.00	0.37
V	0.16	-0.02	-0.09	-0.03	0.13	0.15	0.08	1.00

Treatment = Nassella tenuissima_green roof

Pearson correlation: Coefficients \ probabilities

	Ts	CAS	TSIL	TSSL	TI	TA	R	V
Ts	1.00	4.8E-04	0.00	0.00	0.00	1.8E-05	0.01	0.68
CAS	0.31	1.00	1.0E-03	3.3E-06	1.1E-05	1.1E-07	1.3E-03	0.29
TSIL	0.97	0.30	1.00	0.00	0.00	5.9E-04	0.01	0.37
TSSL	0.95	0.41	0.90	1.00	0.00	0.00	0.64	0.20
TI	0.96	0.39	0.90	0.99	1.00	1.1E-12	0.89	0.16
TA	0.38	0.46	0.31	0.60	0.59	1.00	0.00	0.09
R	-0.23	0.29	-0.25	0.04	-0.01	0.72	1.00	0.37
V	0.04	0.10	-0.08	0.12	0.13	0.15	0.08	1.00

Treatment = Traditional roof

Pearson correlation: Coefficients \ probabilities

	Ts	CAS	TSIL	TSSL	TI	TA	R	V
Ts	1.00	sd						
CAS	sd	1.00	sd	sd	sd	sd	sd	sd
TSIL	sd	sd	1.00	0.00	0.00	0.00	0.01	3.1E-04
TSSL	sd	sd	0.77	1.00	0.00	0.00	0.00	0.05
TI	sd	sd	0.97	0.65	1.00	0.00	0.82	1.2E-03
TA	sd	sd	0.75	0.98	0.63	1.00	0.00	0.09
R	sd	sd	0.23	0.75	0.02	0.72	1.00	0.37
V	sd	sd	0.32	0.18	0.29	0.15	0.08	1.00

Tabla 15: Coeficientes de correlación de Pearson para el ciclo de medición: Cubierta vegetada con *Sedum lineare* - CVSl-, *Nassella tenuissima* -CVNt- y cubierta tradicional -CT-.

Treatment = Aptenia cordifolia_green roof

Pearson correlation: Coefficients \ probabilities

	Ts	CAS	TSIL	TSSL	TI	TA	R	V
Ts	1.00	0.56	1.4E-03	2.9E-09	0.00	0.00	5.8E-05	0.01
CAS	0.05	1.00	0.86	0.05	0.15	0.11	2.5E-04	0.68
TSIL	0.29	-0.02	1.00	3.3E-04	0.00	0.29	1.2E-09	0.06
TSSL	0.51	-0.18	0.32	1.00	5.7E-10	1.2E-04	0.44	0.45
TI	0.85	-0.13	0.63	0.53	1.00	1.0E-06	0.08	0.05
TA	0.74	0.15	-0.10	0.34	0.43	1.00	0.00	0.19
R	0.36	0.33	-0.52	0.07	-0.16	0.68	1.00	0.04
V	-0.25	0.04	-0.18	-0.07	-0.18	-0.12	-0.19	1.00

Treatment = Sedum spectabile_green roof

Pearson correlation: Coefficients \ probabilities

	Ts	CAS	TSIL	TSSL	TI	TA	R	V
Ts	1.00	5.9E-08	5.7E-10	0.00	0.00	0.00	0.06	0.09
CAS	0.47	1.00	6.4E-06	1.2E-06	1.5E-10	1.9E-06	0.01	0.02
TSIL	0.53	0.40	1.00	7.7E-08	0.00	0.70	3.2E-12	0.39
TSSL	0.83	0.43	0.47	1.00	0.00	0.00	0.04	0.60
TI	0.92	0.54	0.78	0.80	1.00	5.6E-08	0.25	0.04
TA	0.64	0.42	-0.04	0.66	0.47	1.00	0.00	0.19
R	0.17	0.24	-0.58	0.19	-0.11	0.68	1.00	0.04
V	-0.16	-0.22	-0.08	-0.05	-0.19	-0.12	-0.19	1.00

Treatment = Traditional roof

Pearson correlation: Coefficients \ probabilities

	Ts	CAS	TSIL	TSSL	TI	TA	R	V
Ts	1.00	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd
CAS	sd	1.00	sd	sd	sd	sd	sd	sd
TSIL	sd	sd	1.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.09
TSSL	sd	sd	0.70	1.00	6.0E-11	0.00	0.00	1.8E-04
TI	sd	sd	0.97	0.55	1.00	1.9E-09	0.69	0.13
TA	sd	sd	0.65	0.89	0.51	1.00	0.00	0.19
R	sd	sd	0.18	0.76	-0.04	0.68	1.00	0.04
V	sd	sd	-0.16	-0.34	-0.14	-0.12	-0.19	1.00

Tabla 16: Coeficientes de correlación de Pearson para el ciclo de medición: Cubierta vegetada con Aptenia cordifolia -CVAc-, Sedum spectabile -CVSe- y cubierta tradicional -CT-.

Treatment = Cynodon dactylon_green roof

Pearson correlation: Coefficients \ probabilities

	Ts	CAS	TSIL	TSSL	TI	TA	R	V
Ts	1.00	0.27	1.2E-07	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
CAS	-0.11	1.00	3.4E-07	0.38	0.04	0.30	0.25	0.25
TSIL	0.51	-0.49	1.00	0.57	0.00	0.41	1.1E-07	0.47
TSSL	0.76	0.09	-0.06	1.00	2.7E-06	0.00	0.00	0.00
TI	0.88	-0.21	0.80	0.46	1.00	8.3E-06	0.13	1.8E-08
TA	0.72	0.11	-0.09	0.98	0.44	1.00	0.00	0.00
R	0.25	0.12	-0.51	0.75	-0.16	0.71	1.00	3.1E-05
V	0.73	0.12	0.07	0.79	0.54	0.80	0.41	1.00

Treatment = Hyalis argentea_green roof

Pearson correlation: Coefficients \ probabilities

	Ts	CAS	TSIL	TSSL	TI	TA	R	V
Ts	1.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.02	1.7E-03	3.8E-04
CAS	-0.23	1.00	1.5E-04	3.8E-06	0.30	0.07	0.07	0.11
TSIL	0.87	-0.38	1.00	0.00	0.00	0.15	4.1E-09	0.70
TSSL	0.91	-0.45	0.98	1.00	0.00	0.90	6.9E-06	0.20
TI	0.95	-0.11	0.73	0.79	1.00	2.5E-07	0.49	1.8E-09
TA	0.24	0.19	-0.15	-0.01	0.50	1.00	0.00	0.00
R	-0.32	0.18	-0.56	-0.44	-0.07	0.71	1.00	3.6E-05
V	0.36	0.16	0.04	0.13	0.57	0.80	0.41	1.00

Treatment = Traditional roof

Pearson correlation: Coefficients \ probabilities

	Ts	CAS	TSIL	TSSL	TI	TA	R	V
Ts	1.00	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd
CAS	sd	1.00	sd	sd	sd	sd	sd	sd
TSIL	sd	sd	1.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.00
TSSL	sd	sd	0.75	1.00	1.1E-10	0.00	0.00	0.00
TI	sd	sd	0.97	0.60	1.00	7.0E-09	0.52	3.8E-12
TA	sd	sd	0.71	0.99	0.55	1.00	0.00	0.00
R	sd	sd	0.15	0.72	-0.07	0.71	1.00	3.1E-05
V	sd	sd	0.74	0.80	0.63	0.80	0.41	1.00

Tabla 17: Coeficientes de correlación de Pearson para el ciclo de medición: Cubierta vegetada con Cynodon dactylon -CVCd-, Hyalis argentea -CVHa- y cubierta tradicional -CT-.

Treatment = Aptenia cordifolia_green roof

Pearson correlation: Coefficients \ probabilities

	Ts	CAS	TSIL	TSSL	TI	TA	R	V
Ts	1.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	7.4E-05	1.3E-11
CAS	-0.11	1.00	0.16	0.06	0.07	0.02	0.56	0.13
TSIL	0.61	-0.13	1.00	0.00	0.00	0.19	2.1E-06	0.37
TSSL	0.89	-0.17	0.80	1.00	0.00	5.6E-10	0.63	1.6E-05
TI	0.89	-0.17	0.85	0.99	1.00	2.6E-09	0.40	4.3E-05
TA	0.78	-0.22	0.12	0.53	0.51	1.00	0.00	0.00
R	0.35	-0.05	-0.42	-0.04	-0.08	0.75	1.00	7.4E-11
V	0.57	0.14	0.08	0.38	0.36	0.62	0.55	1.00

Treatment = Cynodon dactylon_green roof

Pearson correlation: Coefficients \ probabilities

	Ts	CAS	TSIL	TSSL	TI	TA	R	V
Ts	1.00	6.0E-11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.57	1.8E-06
CAS	-0.55	1.00	1.8E-04	1.1E-07	1.8E-11	1.9E-07	0.72	0.95
TSIL	0.69	-0.34	1.00	0.00	0.00	0.22	5.4E-05	0.30
TSSL	0.74	-0.46	0.90	1.00	0.00	0.45	2.5E-08	0.66
TI	0.96	-0.56	0.78	0.85	1.00	9.1E-08	0.12	4.7E-04
TA	0.62	-0.45	0.11	0.07	0.46	1.00	0.00	0.00
R	0.05	-0.03	-0.36	-0.48	-0.14	0.75	1.00	9.5E-11
V	0.42	0.01	0.10	0.04	0.31	0.61	0.55	1.00

Treatment = Traditional roof

Pearson correlation: Coefficients \ probabilities

	Ts	CAS	TSIL	TSSL	TI	TA	R	V
Ts	1.00	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd
CAS	sd	1.00	sd	sd	sd	sd	sd	sd
TSIL	sd	sd	1.00	sd	0.00	0.00	2.4E-03	3.0E-09
TSSL	sd	sd	sd	1.00	sd	sd	sd	sd
TI	sd	sd	0.94	sd	1.00	2.4E-10	0.67	7.5E-05
TA	sd	sd	0.75	sd	0.54	1.00	0.00	0.00
R	sd	sd	0.27	sd	-0.04	0.75	1.00	9.5E-11
V	sd	sd	0.51	sd	0.35	0.61	0.55	1.00

Tabla 18: Coeficientes de correlación de Pearson para el ciclo de medición: Cubierta vegetada con *Aptenia cordifolia* -CVAc-, *Cynodon dactylon* -CVCd- y cubierta tradicional -CT-.

B. TEMPERATURA DE HOJA

En la Figura 52 se presenta la temperatura de hoja en cinco momentos del día, estas mediciones se repitieron tres veces para siete especies que aún permanecían (demostrando una adaptación al sistema de cultivo) al final de los ensayos experimentales (año 2018). Se puede observar que *Hyalis argentea* presenta la menor temperatura promedio diaria de hoja -35.4 °C- y *Nassella tenuissima* se encuentra muy próxima con una temperatura promedio diaria de 36.0 °C. *Aptenia cordifolia*, *Cynodon dactylon*, *Sedum acre*, *Sedum lineare* y *Sedum spectabile* tienen promedios diarios muy próximos: 37.3, 37.5, 37.4, 37.1, 37.4, respectivamente. Esto demuestra que las especies nativas, adaptadas a las condiciones ambientales locales, presentan las menores temperaturas promedio de hoja.

La mayor temperatura máxima promedio diaria la presenta *Cynodon dactylon* con 41.5 °C y las demás especies presentan una máxima cercana a los 40 °C. *Cynodon dactylon*, *Hyalis argentea* y *Sedum lineare* presentan las menores temperaturas promedios diarios mínimas -30 °C-, *Aptenia cordifolia* y *Sedum spectabile* se encuentran en un rango intermedio -31 °C-, y *Sedum acre* -32 °C- y *Nassella tenuissima* -33 °C- presentan las mayores temperaturas medias.

Las mayores temperaturas se presentan en la medición de las 13:30 hs, excepto para *Cynodon dactylon* en la cual sucede a las 15:00 hs. Las menores temperaturas ocurren a las 16:30 hs para *Aptenia cordifolia* y *Sedum spectabile*; y a las 10:30 hs para las demás especies, lo cual permite interpretar que estas especies van aumentando su temperatura a lo largo del día, a diferencia de las primeras.

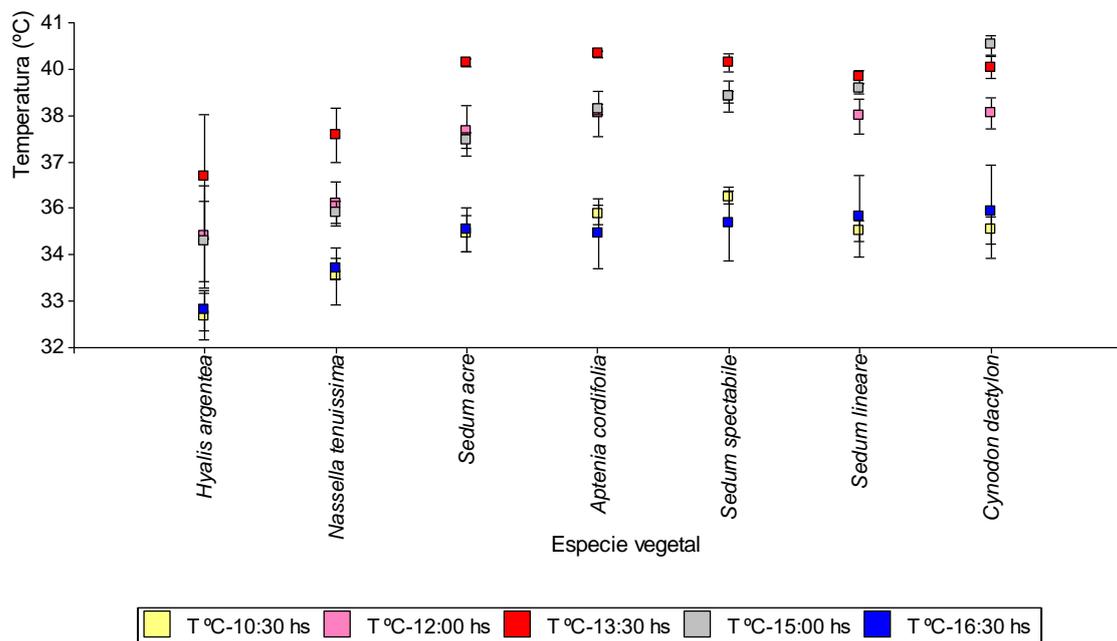


Figura 52: Temperatura de hoja medida con porómetro en conjunto con la conductancia estomática de la hoja en cinco momentos del día (10:30 hs; 12:00 hs; 13:30 hs; 15:00 hs; 16:30 hs) para los días 22/02/2017, 27/02/2018 y 02/03/2018.

Se realizó una prueba entre dos especies vegetales -*Sedum spectabile* y *Nassella tenuissima*- respecto a una membrana de aluminio para comparar el comportamiento térmico superficial de la membrana respecto de las temperaturas de hoja (Figura 53). Se puede observar que en las horas del periodo de enfriamiento –nocturno-, las temperaturas foliares de ambas especies se aproximan a la temperatura de la temperatura superficial de la membrana de aluminio. En cambio, durante el periodo de calentamiento, se observa que la especie nativa *Nassella tenuissima* (promedio 24.40 °C; máxima 38.64 °C) presenta una temperatura foliar inferior a la membrana de aluminio (promedio 27.55 °C; máxima 44.00 °C), a diferencia de *Sedum spectabile* (promedio 27.50 °C; máxima 50.50 °C). La selección adecuada de una especie a destinar al cultivo de una cubierta nos puede generar un significativo impacto en la temperatura superficial de la misma. Del mismo modo, en la Figura 54, para un periodo posterior se realiza una prueba similar y se obtienen resultados similares, la diferencia radica en la incorporación de otra especie nativa, *Hyalis argentea*. Esta especie también presenta buenas aptitudes con respecto a la temperatura

foliar en referencia a la temperatura superficial de la membrana de aluminio, siendo siempre cercana o menor a la misma.

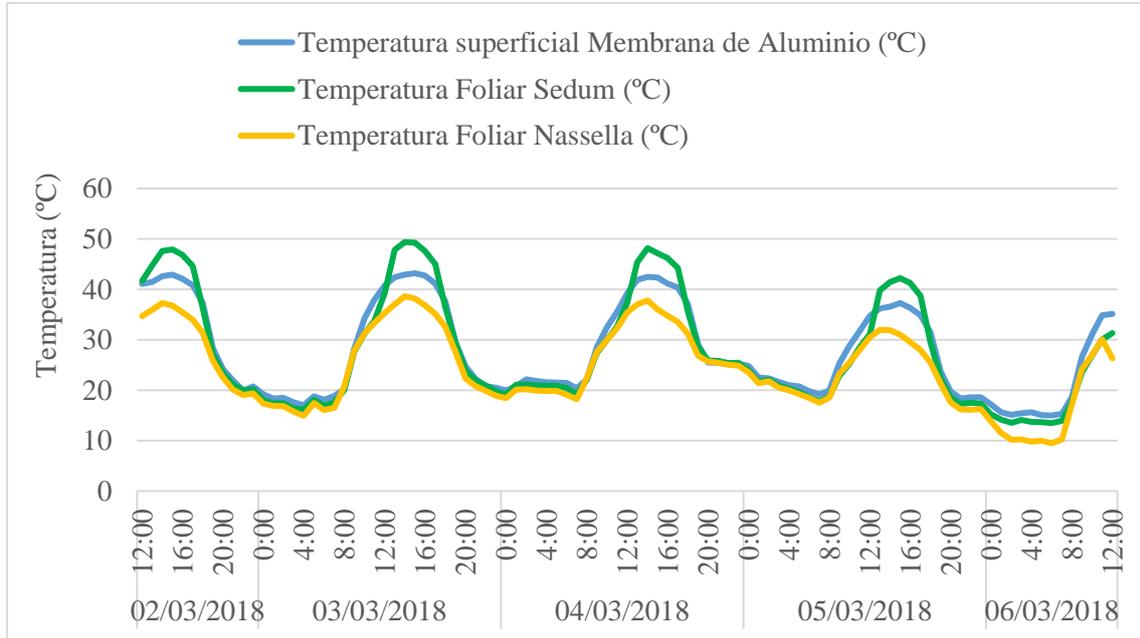


Figura 53: Temperatura de hoja monitoreada con termocuplas en plantas de dos cubiertas vegetadas cubiertas vegetadas y comparadas con la temperatura superficial de una membrana de aluminio.

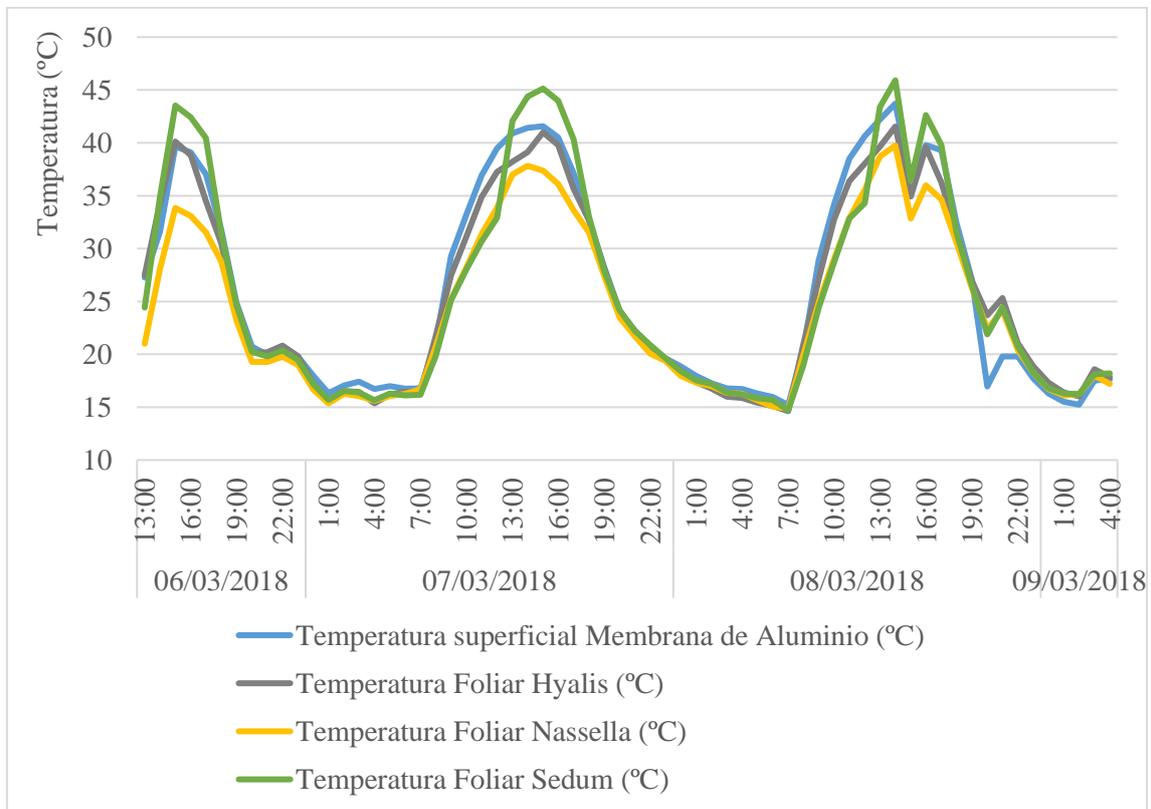


Figura 54: Temperatura de hoja monitoreada con termocuplas en plantas de tres cubiertas vegetadas cubiertas vegetadas y comparadas con la temperatura superficial de una membrana de aluminio.

C. TERMOGRAFÍA DE CUBIERTAS VEGETADAS

Se tomaron imágenes termográficas cada dos horas de 9 a 21 hs en dos días diferentes de verano para obtener una temperatura superficial media de la cubierta vegetada que integre todos los materiales que la conforman. Las imágenes se capturaron en cinco cubiertas vegetadas que presentaban las mayores coberturas vegetales. Como se puede observar en la Figura 55, en la Figura 56 y en la Tabla 19 las cubiertas vegetadas con *Aptenia cordifolia* y *Cynodon dactylon* presentan las mayores temperaturas superficiales medias de ambos días, 31.6 y 29.5 °C, respectivamente. En cambio, las cubiertas vegetadas con *Hyalis argentea* y *Sedum spectabile* presentan las menores temperaturas superficiales medias de ambos días, 28.6 y 28.4 respectivamente. *Nassella tenuissima* se encuentra un punto intermedio, tendiendo a acoplarse a las especies de menor temperatura superficial media como se puede observar en las figuras para ambos días, pero al ser una especie con gran transparencia es posible que las imágenes termográficas tomen mayoritariamente en cuenta el fondo, el cual está compuesto por un sustrato oscuro (debido a la materia orgánica de la tierra preparada) de mayor temperatura que la planta, por lo cual presenta una temperatura superficial media de ambos días analizados de 29.7 °C.

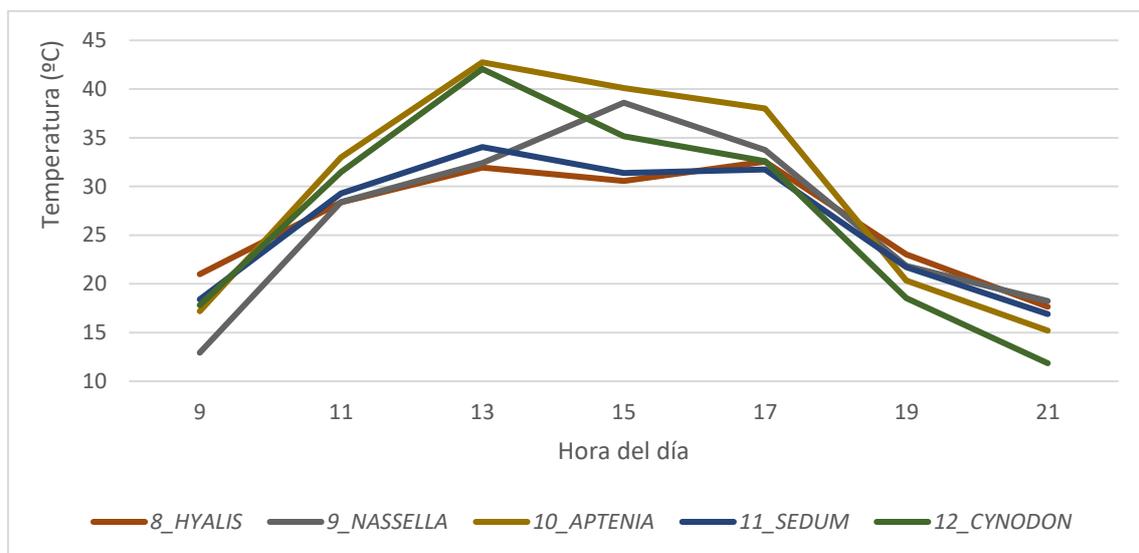


Figura 55: Termografía de cubiertas vegetadas. 14_03_2018

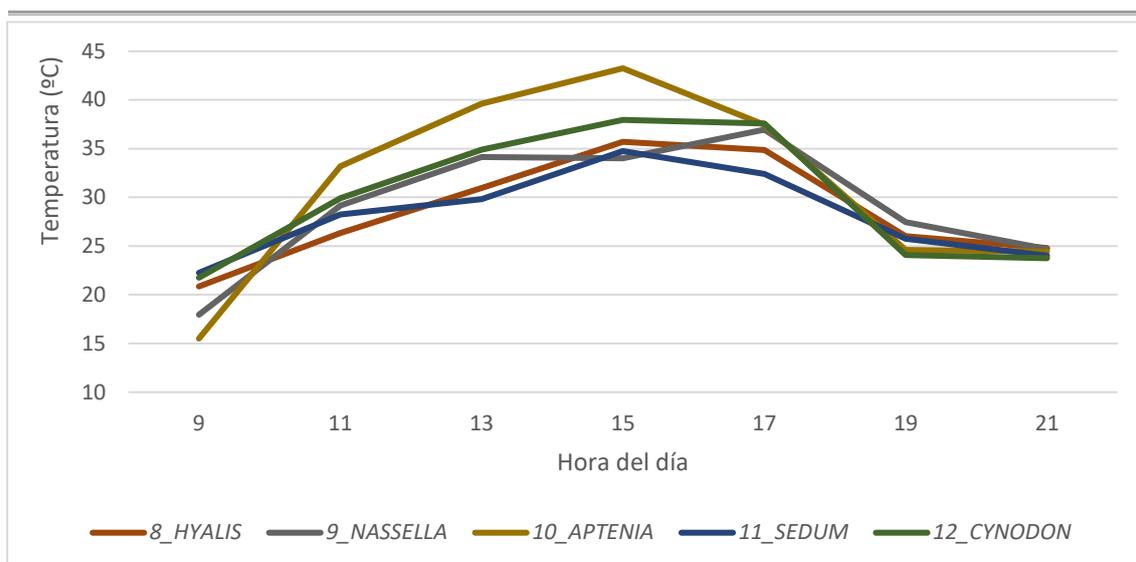


Figura 56: Termografía de cubiertas vegetadas. 16_03_2018

Cubierta vegetada	Temperatura día 14/03/2018			Temperatura día 16/03/2018		
	Promedio	Mínima	Máxima	Promedio	Mínima	Máxima
<i>8_Hyalis argentea</i>	27.3	17.7	34.2	30.0	21.8	37.2
<i>9_Nasella tenuissima</i>	28.4	18.3	40.2	30.9	19.9	38.5
<i>10_Aptenia cordifolia</i>	30.4	15.2	44.3	32.8	17.5	44.7
<i>11_Sedum spectabile</i>	27.1	16.9	35.6	29.7	24.0	36.3
<i>12_Cynodon dactylon</i>	27.4	11.9	39.7	31.6	23.6	39.5

Tabla 19: Temperatura promedio, mínima y máxima de imágenes termográficas en cubiertas vegetadas para los días 14/03/2018 y 16/03/2018

D. ALBEDO DE CUBIERTAS VEGETADAS

Se midió el albedo en tres días diferentes con el objeto de obtener un valor medio representativo de cada cubierta vegetal. Las mediciones se realizaron en cinco cubiertas vegetadas que presentaban las mayores coberturas vegetales. Como se puede observar en la Figura 57, el menor albedo medio lo presenta *Hyalis argentea* -0.44-, debido a su color grisáceo que permite mayor reflectancia de los rayos solares. El mayor albedo medio de las cubiertas vegetadas medidas corresponde a *Cynodon dactylon* -0.48-. Las especies *Nassella tenuissima*, *Aptenia cordifolia* y *Sedum spectabile* se encuentran en valores intermedios de 0.47, 0.47 y 0.46, respectivamente.

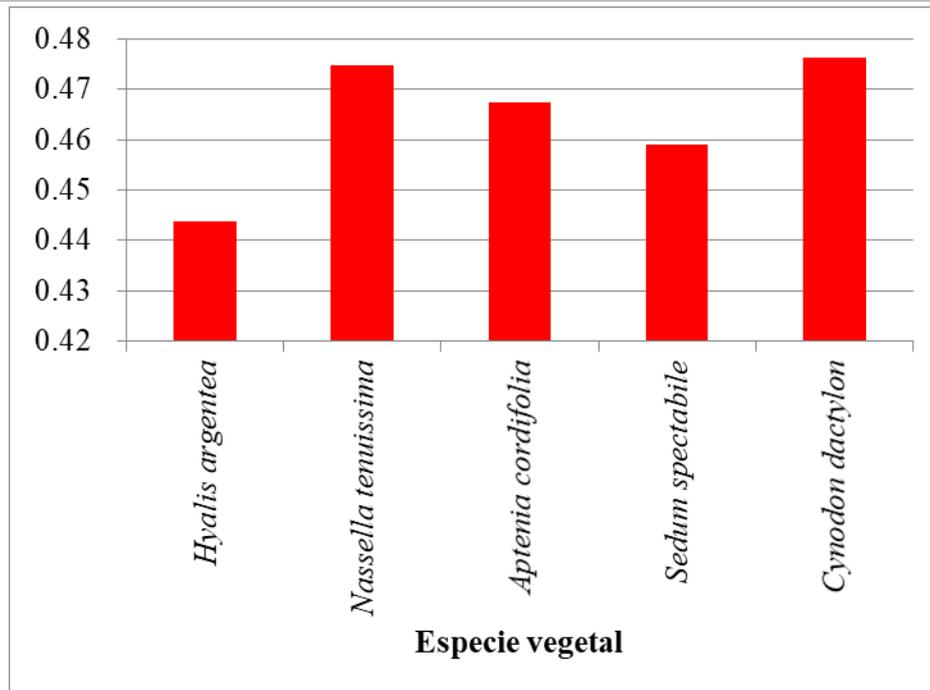


Figura 57: Albedo en cubiertas vegetadas.

I-Conclusiones de respuesta térmica de cubiertas vegetadas a través de ensayos experimentales

A. TEMPERATURAS SUPERFICIALES E INTERIORES CON LA APLICACIÓN DE CUBIERTAS VEGETADAS

En los box con cubiertas vegetadas, las temperaturas medias interiores son del orden de 2 a 3 °C inferiores respecto a la temperatura media interior en el box con cubierta tradicional. Y la amplitud térmica entre 7 y 9 °C menor. Esto implica que, en zonas áridas, en la estación cálida, las cubiertas vegetadas amortiguan en forma significativa la temperatura exterior.

La temperatura media superficial superior en la losa de hormigón de las cubiertas vegetadas es al menos 2 °C inferior que la temperatura media superficial superior en las cubiertas tradicionales. Esto indica que las cubiertas vegetadas atemperan las temperaturas exteriores mientras que la cubierta tradicional, sin aislar, potencia el efecto de las mismas.

Estas diferencias de temperatura interior, temperaturas superficiales y amplitud térmica indicarían la aptitud de las cubiertas vegetadas para mejorar el comportamiento térmico, la habitabilidad y el consumo energético de los espacios interiores como así también contribuyen a disminuir las temperaturas de los espacios abiertos.

Respecto a las cubiertas vegetadas se observan diferencias en el comportamiento térmico del espacio interior asociadas al hábito de crecimiento de la especie colocada. Las especies erguidas -*Nassella tenuissima*, *Sedum spectabile*, *Hyalis argentea*- muestran mayores diferencias de temperatura durante el día en relación al box con cubierta tradicional, que las especies rastreras -*Aptenia cordifolia*, *Sedum lineare*, *Cynodon dactylon*- y, menores diferencias durante la noche, generando un efecto positivo a lo

largo de todo el día. Este comportamiento podría explicarse por el hábito erguido de las especies que contribuyen a disminuir la transferencia de calor debido al sombreado del sustrato y posibilitan la circulación de aire entre el follaje y el sustrato. Esta condición favorece la capacidad aislante de la cubierta durante el día y permite mejores condiciones de enfriamiento durante la noche.

La cubierta vegetada con *Nassella tenuissima*, especie nativa de hábito erguido, es la que muestra mayor capacidad para amortiguar las temperaturas exteriores durante el día y resulta menos conservativo durante las horas de la noche, ya que presenta menores temperaturas mínimas interiores. Respecto al *Sedum lineare* -especie recomendada en la literatura internacional y de hábito rastrero- el comportamiento es similar pero su impacto es de menor magnitud.

Respecto al efecto de atenuación de la temperatura exterior y su relación con las características de la cubierta vegetada, el hábito de crecimiento de la especie explica el comportamiento térmico de la cubierta. El sustrato de *Nassella tenuissima* y el de *Hyalis argentea*, muestran mayores diferencias de temperatura respecto a la temperatura del aire exterior a lo largo de todo el día. En el periodo de calentamiento el mayor contenido de agua del sustrato incrementa el calor específico. Es decir, su capacidad de acumulación. Durante la noche -periodo de enfriamiento- el hábito erguido de estas especies favorece el enfriamiento radiativo y convectivo del sustrato. Este comportamiento diario se verifica para *Sedum spectabile*, también de hábito erguido.

Respecto al sustrato de *Sedum lineare* -especie rastrera- muestra un comportamiento inverso: menos conservativo durante el día y mayor inercia durante la noche, con menor contenido de agua y menor capacidad de enfriamiento radiativo y convectivo nocturno asociado a su hábito de crecimiento.

El análisis de correlaciones de Pearson indica que la variable de mayor influencia y posibilidades de manejo de la temperatura interior de un espacio con cubierta vegetada es la temperatura del sustrato y las temperaturas superficiales de la losa.

Respecto a la temperatura del sustrato, el hábito erguido de las especies evaluadas muestra un impacto positivo en la condición térmica del espacio interior. Mientras que el contenido de agua del sustrato guarda relación con el género de la planta.

B. TEMPERATURA DE HOJA

La temperatura de la hoja representa a la temperatura de la planta. *Hyalis argentea* presenta la menor temperatura promedio de hoja -35.4 °C- y *Nassella tenuissima* se encuentra muy próxima con una temperatura promedio de 36.0 °C. Esto demuestra que las especies nativas, adaptadas a las condiciones ambientales locales, presentan las menores temperaturas promedio de hoja. La mayor temperatura máxima la presenta *Cynodon dactylon* con 41.5 °C. *Cynodon dactylon*, *Hyalis argentea* y *Sedum lineare* presentan las menores temperaturas mínimas -30 °C-, *Aptenia cordifolia* y *Sedum spectabile* se encuentran en un rango intermedio -31 °C-, y *Sedum acre* -32 °C- y *Nassella tenuissima* -33 °C- presentan las mayores temperaturas medias.

Al comparar -*Sedum spectabile* y *Nassella tenuissima*- respecto al comportamiento térmico superficial a una membrana de aluminio se concluye que en las horas del periodo

de enfriamiento –nocturno-, las temperaturas foliares de ambas especies se aproximan a la temperatura de la temperatura superficial de la membrana de aluminio. En cambio, durante el periodo de calentamiento, se observa que la especie nativa *Nassella tenuissima* (promedio 24.35 °C; máxima 40.02 °C) presenta una temperatura foliar inferior a la membrana de aluminio (promedio 27.55 °C; máxima 44.00 °C), a diferencia de *Sedum spectabile* (promedio 27.50 °C; máxima 50.50 °C). La selección adecuada de una especie a destinar al cultivo de una cubierta nos puede generar un significativo impacto en la temperatura superficial de la misma.

C. TERMOGRAFÍA DE CUBIERTAS VEGETADAS

El análisis de las imágenes termográficas permite conocer la temperatura media superficial de una cubierta vegetada, la cual condiciona la temperatura del aire cercano por irradiación y por propiciar fenómenos convectivos. Las cubiertas vegetadas con *Aptenia cordifolia* y *Cynodon dactylon* presentan las mayores temperaturas superficiales medias, 31.6 y 29.5 °C, respectivamente. En cambio, las cubiertas vegetadas con *Hyalis argentea* y *Sedum spectabile* presentan las menores temperaturas superficiales medias de ambos días, 28.6 y 28.4 respectivamente. *Nassella tenuissima* se encuentra un punto intermedio.

D. ALBEDO DE CUBIERTAS VEGETADAS

Los albedos en conjunto a las temperaturas superficiales indican el comportamiento térmico de una cubierta vegetada a escala edilicia y a escala urbana debido al manejo del recurso solar que se puede deducir de estas variables. Mayores albedos y menores temperaturas superficiales implican menor ganancia solar a escala edilicia y menor calentamiento a escala urbana. El menor albedo medio lo presentó la especie nativa *Hyalis argentea* -0.44-, y el mayor en cambio, corresponde a *Cynodon dactylon* -0.48-. Las especies *Nassella tenuissima*, *Aptenia cordifolia* y *Sedum spectabile* se encontraron en valores intermedios.

II-Metodología de investigación de respuesta térmica de cubiertas vegetadas a través de herramientas de predicción del microclima urbano y edilicio

A. ESCALA EDILICIA

A.1. Selección y descripción del modelo de simulación

Una vez obtenido el diagnóstico térmico a través de mediciones en ensayos experimentales (Capítulo 4-I) se validan los modelos generados mediante programas de simulación. Estas herramientas, tienen la potencialidad de obtener conocimiento de otras variables con modelos ajustados que no han sido medidas en ensayos experimentales; como así también, la aplicación de estos modelos a proyectos o análisis en diferentes escalas o escenarios propuestos.

Se utiliza el software EnergyPlus, versión 7.0. Este programa de simulación térmica y energética de edificios ha sido desarrollado por DOE (Department of Energy, Estados Unidos, 2009), a partir de códigos de BLAST y DOE2 (Scarduelli et al, 2009). Trabaja en régimen dinámico y permite interrelacionar las prestaciones de los sistemas energéticos con las características de la materialidad de la envolvente edilicia. El programa, entre las numerosas posibilidades que ofrece, calcula el comportamiento térmico transitorio de un edificio en base a los datos climáticos, uso, materiales, geometría, equipamiento, etcétera; y permite el cálculo combinado de temperatura y humedad.

Asimismo, simula cargas de ventilación, calefacción, refrigeración, iluminación natural y artificial, cargas internas e instalaciones de climatización, temperaturas internas de cada espacio, temperatura operativa, superficial y radiante media, entre otras.

Con las variables climáticas medidas en el período seleccionado, se conforma el archivo de clima requerido para la simulación de los modelos. Los datos necesarios para realizar el archivo son: radiación global sobre superficie horizontal, radiación difusa sobre superficie horizontal, radiación directa normal al haz, temperatura de bulbo seco exterior, humedad relativa exterior, velocidad y dirección de vientos. La radiación directa al haz y difusa sobre plano horizontal se calculan por medio de un módulo de cálculo anexo al SIMEDIF (Flores, et al. 2005) ingresando la radiación global sobre superficie horizontal y los datos geográficos del lugar.

A.2. Configuración y datos de entrada del modelo físico para la simulación

Se tomaron mediciones para ajustar los modelos de simulación dinámica. Los box experimentales (descritos en el diseño experimental del apartado I-Respuesta térmica) se definieron geoméricamente utilizando el programa Open Studio Plug-in para SketchUp Pro Versión 2016. Los datos se ingresaron desde el software EnergyPlus versión 8.8 (Energy Plus, 2009).

El ajuste del modelo tiene dos etapas: en la primera, se simuló el caso control. Las propiedades térmicas y ópticas de la envolvente de materiales del box se obtuvieron de acuerdo con la bibliografía local (Esteves, 2017). En el techo se ingresó una capa

correspondiente a la losa de hormigón armado. Las paredes se ingresaron como un elemento compuesto por tres capas (de interior a exterior): una placa de aglomerado, poliestireno expandido y una placa cementicia. Las mismas capas se usaron en el piso, más una capa de concreto (subsuelo) y tierra.

En una segunda etapa, se agregó el módulo "Material Roof Vegetation". La descripción detallada de los datos de construcción asumidos en el modelo se presenta en la Tabla 20 para el caso de control y en la Tabla 21 para los módulos de cubierta vegetada.

Layers	Roughness	Thickness [m]	Conductivity [W/m°C]	Density [Kg/m ³]	Specific Heat [J/Kg°C]
ROOF					
Reinforced Concrete	Rough	0.15	1.7	2400	800
WALLS					
Chipboard	Medium Smooth	0.018	0.17	1000	1000
Expanded polystyrene	Medium Smooth	0.05	0.04	20	100
Cement board	Medium Smooth	0.01	0.15	600	800
FLOOR					
Soil	Rough	1.00	0.87	2000	840
Concrete (Subfloor)	Rough	0.05	0.78	1600	780
Chipboard	Medium Smooth	0.018	0.17	1000	1000
Expanded polystyrene	Medium Smooth	0.03	0.04	20	100
Cement board	Medium Smooth	0.01	0.15	600	800

Tabla 20: Datos por detalle constructivo para el caso control

A fines de obtener un análisis más comparativo entre las cubiertas vegetadas y de acuerdo a los resultados del comportamiento térmico de las mismas en ensayos experimentales (Capítulo 4-A), se comparan dos especies que son muy diferentes entre sí. *Hyalis argentea* es una especie nativa, arbustiva, de color gris y; *Aptenia cordifolia* es una especie exótica adaptada, rastrera, carnosa y de color verde (el comportamiento biológico de las especies se describe en el Capítulo 3-Respuesta biológica).

Field	Units	<i>Aptenia cordifolia</i>	<i>Hyalis argentea</i>
Height of Plants	<i>m</i>	0.12	0.70
Leaf Area Index	<i>dimensionless</i>	3.3	4.5
Leaf Reflectivity	<i>dimensionless</i>	0.22	0.22
Leaf Emissivity		0.95	0.95
Minimum Stomatal Resistance	<i>s/m</i>	64	50
Soil Layer Name		Green Roof Soil	Green Roof Soil
Roughness		Very Rough	Very Rough
Thickness	<i>m</i>	0.15	0.15
Conductivity of Dry Soil	<i>W/m K</i>	0.20	0.20
Density of Dry Soil	<i>kg/m³</i>	1100	1500
Specific Heat of Dry Soil	<i>J/kg K</i>	2000	2000

Thermal Absortance	0.90	0.90
Solar Absortance	0.54	0.50
Visible Absortance	0.75	0.75
Saturation Volumetric Moisture Content of the Solid Layer	0.50	0.50
Residual Volumetric Moisture Content of the Solid Layer	0.10	0.05
Initial Volumetric Moisture Content of the Solid Layer	0.50	0.25
Moisture Diffusion Calculation Method	Advanced	Advanced

Tabla 21: Datos de entrada para el módulo "Material: Roof Vegetation".

En la Tabla 21 se utilizaron los datos obtenidos de ensayos experimentales, a excepción de: a)-Las variables: *Leaf reflectivity*, *Leaf emissivity*, *Thermal Absortance* y *Visible absortance* se obtuvieron de bibliografía (Oke, 2002; Sailor, 2011; DOE, 2015); b)-Los parámetros: *Conductivity of Dry Soil*, *Density of Dry Soil*, *Specific Heat of Dry Soil* se fueron aproximando paramétricamente hasta lograr el mejor ajuste del modelo.

Otros aspectos considerados para el ajuste fueron:

Teniendo en cuenta las características del contexto real de los box de ensayo, el parámetro de simulación del edificio para el terreno fue la opción "country".

El Algoritmo de Balance de Calor utilizado en este modelo fue Funciones de Transferencia de Conducción.

Para que el software calcule el consumo energético en el interior de los box se configuró una temperatura de termostato de 24 °C para todos los días y en todas las horas.

Los coeficientes de convección de las superficies para las paredes interiores, el piso y el techo se fijaron en 6 W/m²K (Duffie & Beckman, 1991). El software calcula los coeficientes convectores de los muros exteriores a través de un modelo detallado que procesa la orientación de la superficie, la velocidad del viento y la dirección.

El box se ajustó en dos períodos de 10 días, del 9 al 18 de enero para la cubierta vegetada con la especie *Aptenia cordifolia* y 27 de enero al 5 de febrero para el caso de *Hyalis argentea*. Las simulaciones se programaron durante un mes antes de la fecha seleccionada porque es importante que el modelo físico se ingrese con anticipación.

Los principales objetivos de la simulación con EnergyPlus de las cubiertas vegetadas - caracterizadas a través de mediciones en ensayos experimentales- son, luego de su ajuste, 1- Deducir variables o conocer parámetros descriptivos de las cubiertas vegetadas que no son conocidos y responden al modelo; 2- Calcular el consumo energético de los casos medidos, con sus pares simulados y ajustados.

A.3. Escenarios propuestos

A los casos control, con cubierta tradicional o con cubiertas vegetadas -*Aptenia cordifolia* o *Hyalis argentea*- se suma un escenario en el cual la cubierta tradicional que no presenta aislantes, se le adiciona un aislante que está conformado por una capa de poliestireno expandido de baja densidad de 50 mm de espesor. Por lo cual los escenarios propuestos son los siguientes:

-
- Box con cubierta tradicional sin aislar
 - Box con cubierta tradicional aislada
 - Box con cubierta vegetada con *Aptenia cordifolia*
 - Box con cubierta vegetada con *Hyalis argentea*

B. ESCALA URBANA

Luego de obtener los datos de entrada de materiales y tecnologías de techo con el software EnergyPlus, se modeló con los escenarios urbanos paramétricos del software ENVI-met. Estos escenarios incorporan 4 tecnologías de techo con respecto a un caso base de estudio.

B.1. Selección y descripción del modelo de simulación

El desarrollo de modelos o escenarios teóricos se realizó mediante el uso del software ENVI-met 3.1. Este software es de acceso gratuito y fue desarrollado por el grupo de trabajo Environmental Modelling Group del Dr. Michael Bruse del Institute of Geography of the University of Mainz, Alemania (<http://www.envi-met.com>). El uso de ENVI-met está ampliamente validado tanto a nivel internacional como nacional (Ali-Toudert, 2005; Chowa & Brazel, 2012; Tumini, 2012; Perini & Magliocco, 2014; Alchapar, 2014; Middel et al., 2014; Stocco, 2016).

Tal como referencia la tesis doctoral de Alchapar, (2014); ENVI -met posee las ventajas de realizar una representación detallada de estructuras y materialidades urbanas complejas, es decir, edificios con diferentes formas y alturas, y propiedades ópticas de materiales. La vegetación es considerada no sólo como un obstáculo poroso al viento y a la radiación solar, sino también mediante la inclusión de los procesos fisiológicos de evapotranspiración y fotosíntesis. El suelo también se considera como un volumen compuesto de varias capas y tipologías. La alta resolución espacial (hasta 0.5 m en sentido horizontal) y temporal (hasta 10 segundos) permitir una detallada lectura de los cambios microclimáticos. Por último, proporciona un gran número de datos de salida o “outputs”.

ENVI-met es un modelo computacional 3D que trabaja a escala urbana dentro de un ciclo diario. Su propósito es simular las interacciones entre el aire y las superficies de un entorno urbano mediante las leyes fundamentales de la dinámica de fluidos y la termodinámica (Bruse, 1999). Los límites del modelo -horizontal superior y el límite vertical a barlovento- actúan como una interfaz entre el modelo 1D y el modelo 3D. El modelo 1D extiende el área simulada hasta una altura de 2500 metros (capa límite) y transfiere todos los valores iniciales al límite superior del volumen correspondiente al modelo en 3D de la simulación.

El área núcleo a simular es un volumen en tres dimensiones (X, Y, Z) representado gráficamente mediante “n” módulos dentro de una grilla. La dimensión Z está determinada por la altura máximo Hmax de los elementos urbanos dentro del modelo ($Z \geq 2 \cdot H_{max}$). Cada módulo ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$) es parte de una edificación, vegetación, o espacio abierto. La primera grilla del modelo se divide verticalmente en cinco partes iguales con el fin de registrar detalladamente el microclima cercano a las superficies.

El modelo de suelo suministra al sistema las temperaturas y humedades superficiales. El modelo de suelo es 1D, excepto las grillas de la superficie de la tierra que están conectadas

en 3D para asegurar la homogeneidad. Las grillas de anidación o “nesting grids” conforman una “zona de amortiguación”, que actualiza los valores iniciales de las variables en el borde del área del núcleo del modelo 3D, con el fin de evitar perturbaciones numéricas. Las grillas de anidación también ajustan el perfil inicial de viento en el modelo 1D de borde, de modo que el perfil de viento en 3D dentro del modelo central es representativo. La zona de anidación se extiende al doble de los obstáculos más altos en el área del modelo ($2 \cdot H_{\max}$).

La Figura 58 muestra de manera sintética las ecuaciones utilizadas en el modelo. Cabe aclarar que las ecuaciones que rigen ENVI-met son numerosas por tratarse de un software tan completo y potente; por lo tanto, se reportan los principios generales. Así mismo, en la página web se encuentra un completo manual que muestra cada una de las ecuaciones consideradas para la obtención de los resultados (<http://www.envi-met.com/documents/onlinehelpv3/helpindex.htm>).

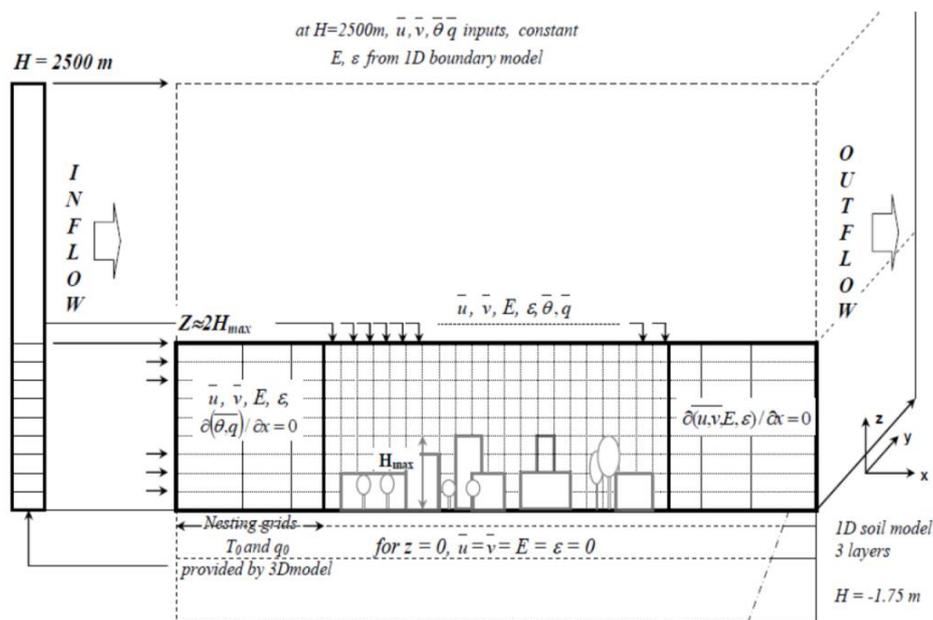


Figura 58: Esquema general del modelo ENVI-met. Fuente: Bruse, 1999.

B.2. Configuración y datos de entrada del modelo físico para la simulación

ENVI-met trabaja con una serie de datos de entrada o “inputs”, siendo estos datos diferenciados en tres componentes de entrada:

- Area Input File se crea a través de una interfaz gráfica y contiene principalmente los datos geométricos del modelo simulado. El espacio físico se genera a través del archivo “ENVI Eddi”, en este archivo se genera el modelo 3D utilizando una malla tridimensional sobre una base definida por el usuario. En esta malla se especifican la posición geográfica en la tierra del modelo a simular y la geometría del entorno del modelo en detalle. La interfaz de representación gráfica genera los modelos a simular utilizando los siguientes parámetros: Buildings, posición y altura de los edificios; Vegetation, tipo de vegetación, lugar de implantación y superficie que ocupa; Soils, distribución de materiales de superficie y tipos de

suelo; Receptors, puntos de monitoreo seleccionados dentro del modelo que muestran el estado de la atmósfera, la superficie y el suelo (archivo de salida o “output”); Sources, fuentes de contaminación. La información de las superficies de los suelos (SOILS.DAT y PROFILS.DAT), la existencia y tipo de vegetación están asociados a una base de datos que respeta la posición dentro del modelo.

- Database se refiere a los datos y características de elementos como vegetación y estratos del suelo. Cada archivo contiene los parámetros utilizados para las ecuaciones de los modelos físico-matemáticos implementados por el software.
- Configuration File se ingresan parámetros de cálculo iniciales y condiciones de contorno que caracterizan la simulación. En este archivo se indican todos los datos iniciales de configuración de la simulación a realizar, como así también los datos climáticos iniciales. Cada escenario a simular debe tener su archivo .cf específico. Las variables mínimas (obligatorias) que se deben ingresar son: velocidad y dirección de viento (m/s) a 10 m de altura; rugosidad de suelo (z_0); temperatura atmosférica inicial (K) y humedad específica (gr agua/ kg aire) a 2500m de altura; y humedad relativa (%) a 2 m de altura. La recolección de datos de las variables necesarias se obtuvo de la estación meteorológica ubicada en el Aeropuerto de Mendoza (velocidad, dirección de viento a 10m de altura), la rugosidad de suelo (z_0) se referencia a la metodología desarrollada por Katzschner, (1997); adoptando en este estudio un coeficiente de rugosidad de superficie =0.1, la temperatura atmosférica inicial (K) y humedad específica (gr. agua/ kg. aire) a 2500 m de altura se obtuvieron mediante los datos de radiosondas recogidos desde la Universidad de Wyoming - Facultad de Ingeniería - Departamento de Ciencias de la Atmósfera utilizando la fuente de SAME Mendoza Aero-Observatorio, estación 87418. Los datos fueron extraídos de este sitio, porque los valores numéricos han sido digitalizados, en lugar de los resultados gráficos obtenidos en nuestro país a partir de estos procedimientos. Por último, la humedad relativa (%) a 2m de altura se recogió de los sensores de monitoreo fijos, modelo H08-003-02, ubicados en canal vial.
- En cuanto a determinar la duración total de la simulación se utilizó un periodo de 72h por estar recomendado con el fin de estabilizar el modelo y evitar problemas de inicialización, tomando como salida válida sólo aquellos valores de las últimas 24h para reproducir correctamente la fenomenología que caracteriza el día elegido. En cuanto al horario de iniciación se recomienda que el mejor momento para iniciar la simulación sea durante la noche o temprano en la mañana para dejar que el software siga los fenómenos atmosféricos, por esta razón las simulaciones comenzaron a las 00:00:00 a.m. (Salata et al., 2016). A continuación, la Figura 59 resume la estructura de carga o inputs y salida u outputs de los datos del software.

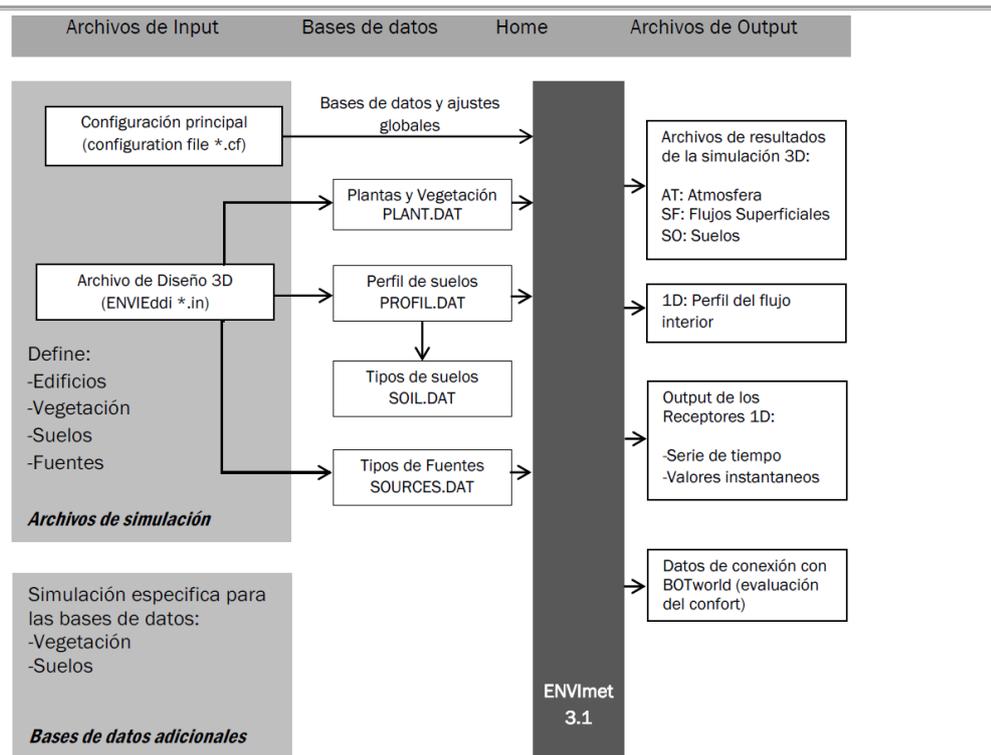


Figura 59: Estructura de ENVI-met.

El archivo PLANT.DAT fue editado con datos obtenidos de las mediciones realizadas en el Capítulo 3: “Respuesta biológica”, para que el comportamiento de los techos verdes respondiese a las condiciones locales. Esas variables son: resistencia estomática mínima de la planta, albedo, altura de la canopia vegetal y profundidad de exploración de raíces.

B.3. Descripción del área de estudio

Para esta investigación, un barrio social del Área Metropolitana de Mendoza, llamado Barrio Cementista, fue seleccionado como caso de estudio. Se encuentra ubicado en el municipio de Las Heras, que es la segunda población más grande (INDEC 2010) de la provincia de Mendoza (12%). La ubicación del vecindario muestra un gran potencial para la rehabilitación urbana porque ha crecido de manera continua en las últimas décadas.

Las características del área evaluada son: baja densidad constructiva y uso residencial (Figura 60). En cuanto a la configuración morfológica, el área se caracteriza por bloques rectangulares, entre 16 y 20 m de ancho de calle, 3 m de ancho de acera, 3 m de altura de edificio, 0.15 a 0.19 relación entre altura de edificio y ancho de calle (H/W), 80% de superficie construida promedio en lotes y 13% de la forestación urbana, principalmente *Morus alba* “Morera blanca” (Sosa et al., 2017).

Los materiales que conforman las fachadas del cañón urbano son predominantemente revestimientos de piedra y ladrillo, o pinturas grises y beige. La reflectancia solar media ($\hat{\alpha}$) de los materiales verticales es 0,25. Para superficies horizontales, la calle es pavimentada con hormigón y el techo está predominantemente inclinado con tejas cerámicas ($\hat{\alpha} = 0.35$) (Alchapar et al, 2016). Uso generalizado del

pavimento peatonal tipo calcáreo, en colores rojos ($\hat{\alpha} = 0.3$). Este grupo de pavimento representa el 80% de todas las aceras en MMA (Alchapar et al, 2014).

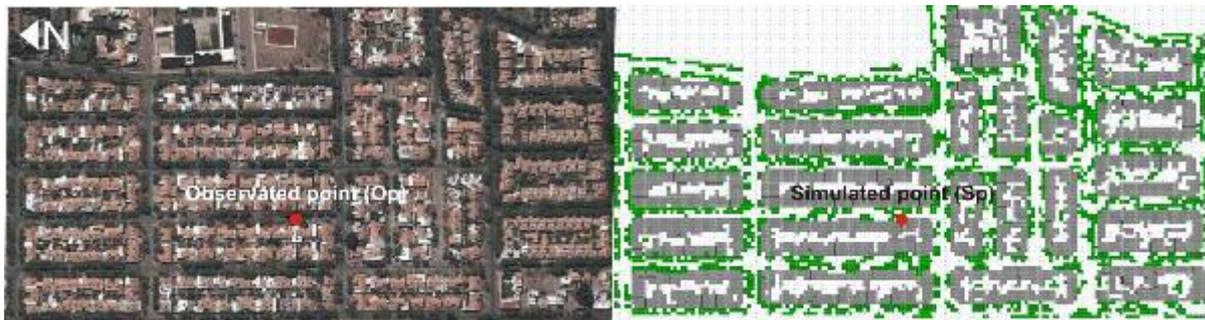


Figura 60: Imagen satelital (izquierda). Área de estudio: edificaciones (gris), arbolado de alineación (verde), localización de receptores (medido -Op- y simulado -Sp-).

Las propiedades y las condiciones de la simulación utilizadas en la configuración del estudio de caso se enumeran en la Tabla 22.

MAIN DATA	Wind Speed in 10 m ab. Ground [m/s]	2.8
	Wind Direction (0:N; 90:E;180:S; 270:W)	150
	Roughness Length z_0 at reference point	0.1
	Initial Temperature Atmosphere [K]	299
	Specific Humidity in 2500 m [g water/kg air]	3
	Relative Humidity in 2m [%]	25.7
BUILDING DATA	Inside Temperature [K]	297
	Heat Transmission Walls [W/m ² K]	2
	Heat Transmission Roofs [W/m ² K]	0.75*
	Albedo Walls	0.2
	Albedo Roofs	0.30*
	Initial Temperature Upper Layer (0-20 cm) [K]	300
SOIL DATA	Initial Temperature Middle Layer (20-50 cm) [K]	297
	Initial Temperature Deep Layer (below 50 cm)[K]	295
	Relative Humidity Upper Layer (0-20 cm)	40
	Relative Humidity Middle Layer (20-50 cm)	50
	Relative Humidity Deep Layer (below 50 cm)	50

Tabla 22: Parámetros de entrada para simulaciones de ENVI-met. Se indica con "*" las variables que se modifican en los escenarios simulados.

B.4. Escenarios propuestos

Para evaluar el impacto de distintas tecnologías de cubierta en el comportamiento térmico a escala urbana, se simularon 4 casos: dos con cubiertas de losa de hormigón armado -sin aislar y aislada térmicamente- y dos cubiertas vegetadas -con *Hyalis argentea* y con *Aptenia cordifolia*-. Estos cuatro casos se simularon en tres escalas: baja, media y alta densidad constructiva (Figura 61). Lo que resulta en 12 escenarios que se indican en la Tabla 23. La baja densidad constructiva conserva la escala del caso base, en cambio, la media densidad constituye volúmenes de 15 metros de altura y la alta densidad de 30 metros de altura.

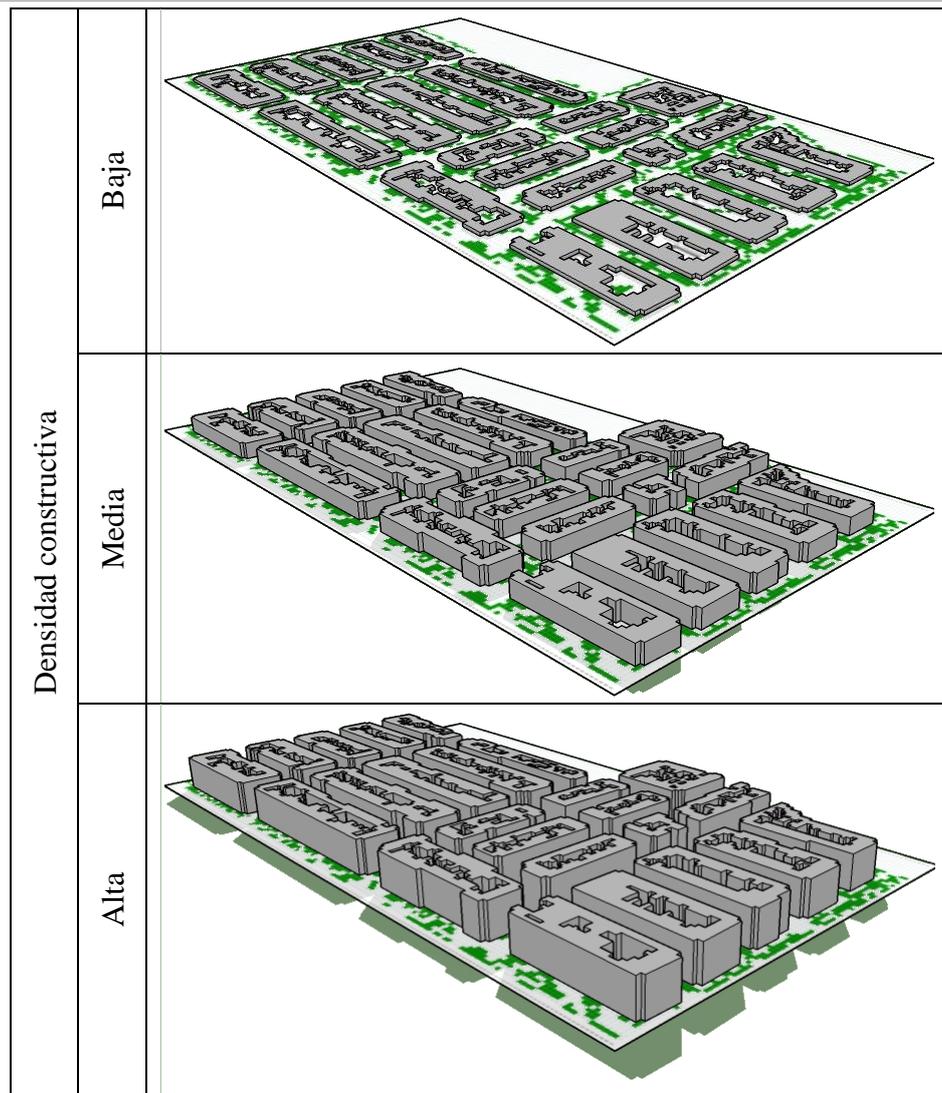


Figura 61: Densidades constructivas edilicias utilizadas para simular los escenarios con ENVI-met

Escenario	Tecnología de cubierta		U-value [W/m ² K]			Albedo
			BD	MD	AD	
Caso base	Techo de madera	Tejas cerámicas rojas	0.75	-	-	0.30
CT1	Techo de losa de hormigón armado	Membrana de aluminio sin aislar	2.79	3.44	3.55	0.86
CT2		Membrana de aluminio aislada	0.62	0.65	0.65	0.86
CV1		Cubierta vegetada con <i>Hyalis argentea</i>	0.28	0.28	0.28	0.47
CV2		Cubierta vegetada con <i>Aptenia cordifolia</i>	0.59	0.61	0.61	0.44

Tabla 23: Escenarios de simulación propuestos (CT= cubierta tradicional, CV= cubierta vegetada, BD=baja densidad edilicia, MD=media densidad edilicia, AD=alta densidad edilicia).

La conductividad térmica para el cálculo del U-value o transmitancia térmica de los casos con cubierta vegetada se obtuvo a partir del ajuste de las simulaciones con Energy-plus

con las mediciones en ensayos experimentales, lo cual permitió el despeje de esta variable del modelo ajustado (Tabla 21). La conductividad térmica de los casos sin cubierta vegetada se obtuvo a partir de bibliografía (Esteves, 2017). La velocidad del viento para el cálculo de la transmitancia térmica de todos los escenarios se modificó para cada densidad edilicia con la fórmula exponencial del perfil de viento de acuerdo a cada altura (Guevara, 2008).

El albedo de techos de madera con tejas cerámicas rojas y de losa de hormigón armado con membrana de aluminio -sin aislar y aislada- provienen de bibliografía (Alchapar et al., 2016); el albedo de cubiertas vegetadas proviene de mediciones en ensayos experimentales (analizados en el apartado I de este capítulo).

II-Resultados de respuesta térmica de cubiertas vegetadas a través de herramientas de predicción del microclima urbano y edificio

A. ESCALA EDILICIA

A.1. Ajuste del modelo de simulación

A.1.1. Caso Cubierta tradicional sin aislar versus cubierta vegetada con *Aptenia cordifolia*

Los ajustes entre las curvas de datos simulados y las curvas de datos obtenidos por mediciones en ensayos experimentales se presentan en la Figura 62, la cual muestra la relación entre las temperaturas medidas y simuladas en los dos casos estudiados: el caso de control con cubierta tradicional y el caso control con cubierta vegetada con *Aptenia cordifolia*. En la Tabla 24 se pueden observar los ajustes diarios entre curvas simuladas y medidas para ambos casos, los R^2 son superiores a 0.85 en todos los casos. El modelo simulado para el caso de control con cubierta tradicional está configurado para diferencias menores de 1 °C en comparación con los datos medidos, excepto en el máximo, donde las diferencias de las temperaturas simuladas son levemente mayores a 1 °C que las medidas. Para el caso control con cubierta vegetada con *Aptenia cordifolia* se puede observar un leve desfasaje temporal entre el modelo simulado y el medido: el caso simulado presenta una ganancia mayor (máxima de dos horas) con respecto al caso real. Ese desfasaje se refleja también en la fase decreciente de la curva, en la etapa de enfriamiento. Se observa también que la curva CV Simulada con *Aptenia cordifolia* tiene un mínimo sesgo que intenta imitar la curva de temperatura exterior, es decir, la curva de radiación como lo hace la temperatura del aire exterior. En cambio, la curva de la temperatura CV medida con *Aptenia cordifolia* se muestra suavizada, con menor sensibilidad al ambiente exterior.

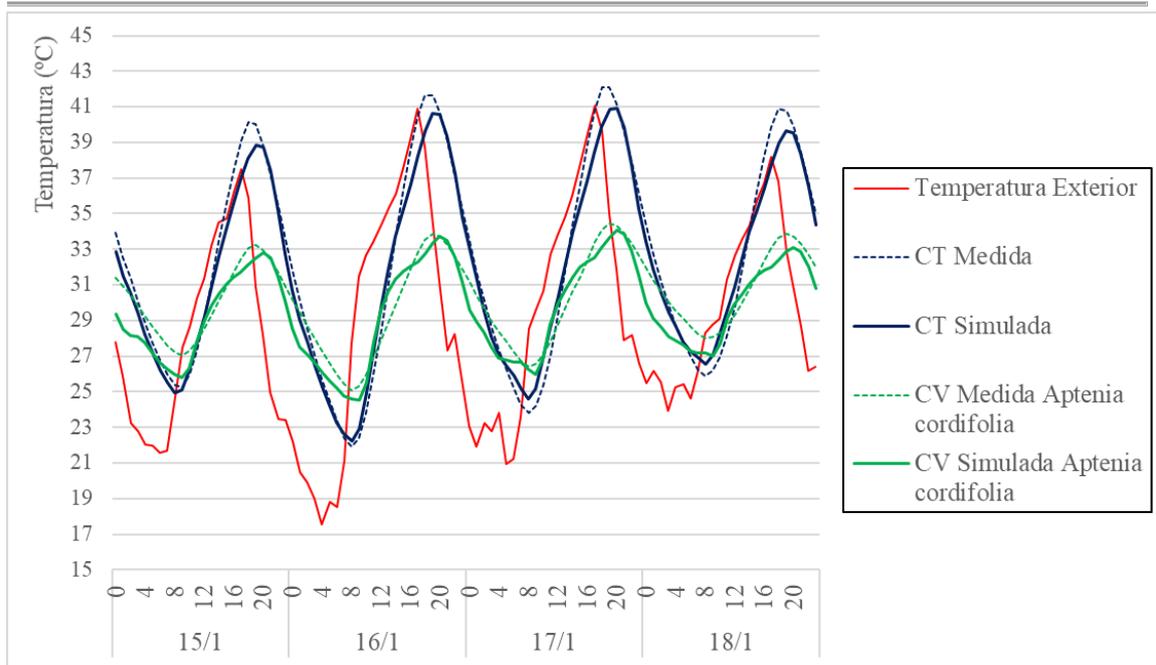
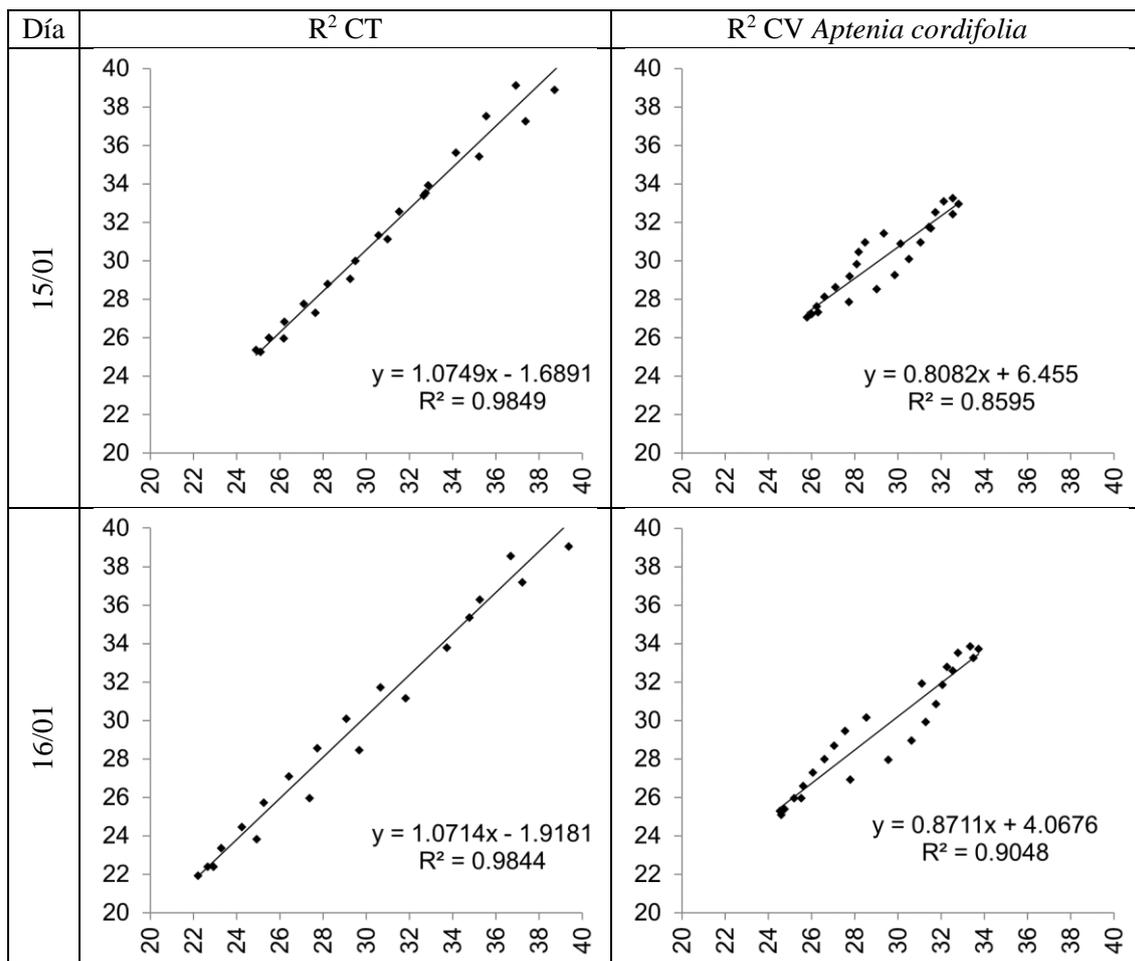


Figura 62: Relación entre curvas de temperatura medidas y simuladas con EnergyPlus para el caso con cubierta tradicional y para el caso con cubierta vegetada con *Aptenia cordifolia*



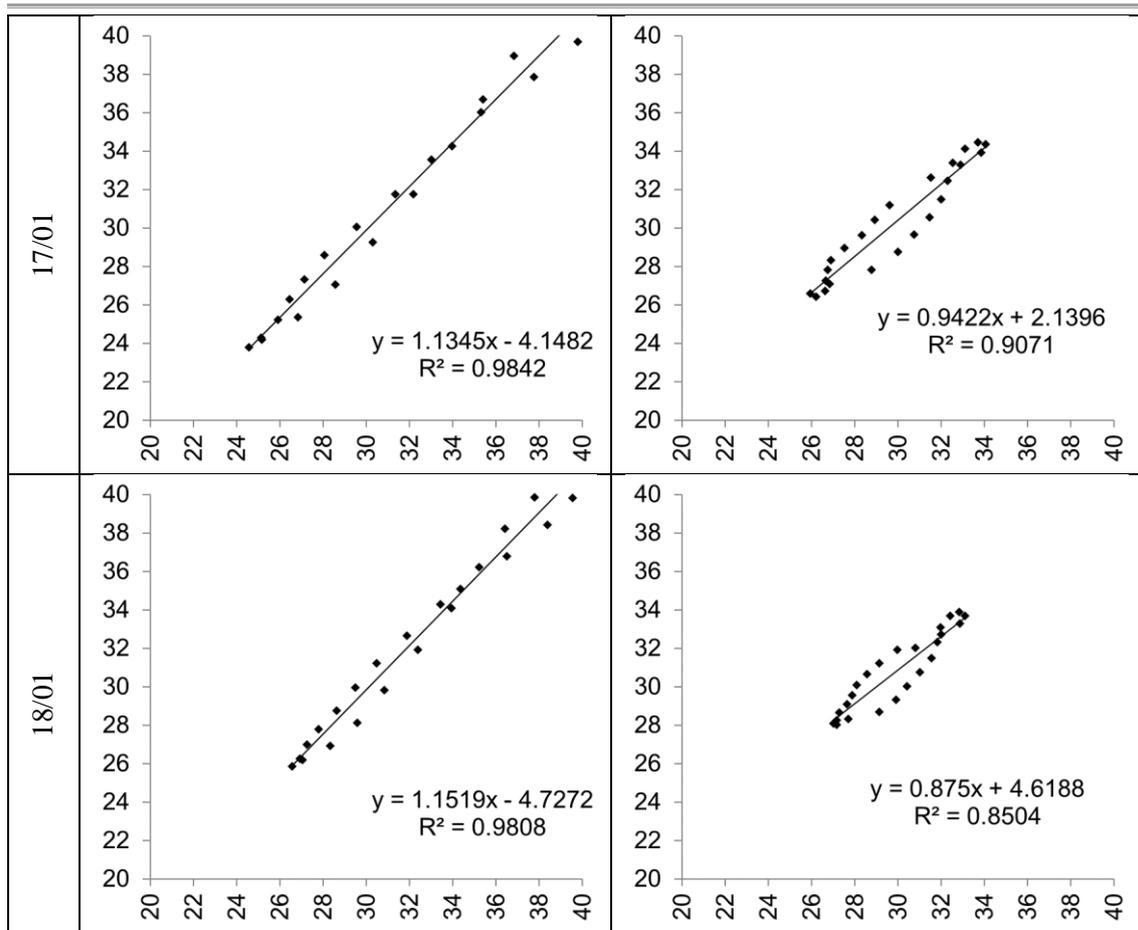


Tabla 24: Ajuste de los días simulados con EnergyPlus para el caso con cubierta tradicional y para el caso con cubierta vegetada con *Aptenia cordifolia*

A.1.2. Caso Cubierta tradicional sin aislar versus cubierta vegetada con *Hyalis argentea*

Los ajustes entre las curvas de datos simulados y las curvas de datos obtenidos por mediciones en ensayos experimentales se presentan en la Figura 63, la cual muestra la relación entre las temperaturas medidas y simuladas en los dos casos estudiados: el caso de control con cubierta tradicional y el caso control con cubierta vegetada con *Hyalis argentea*. En la Tabla 25 se pueden observar los ajustes diarios entre curvas simuladas y medidas para ambos casos, los R² son superiores a 0.85 en todos los casos. El modelo simulado para el caso de control con cubierta tradicional está configurado para diferencias menores de 1 °C en comparación con los datos medidos, excepto en el máximo, donde las diferencias de las temperaturas simuladas son levemente mayores a 1 °C que las medidas. Para el caso control con cubierta vegetada con *Hyalis argentea* se puede observar un leve desfase temporal entre el modelo simulado y el medido: el caso simulado presenta una ganancia mayor (máxima de dos horas) con respecto al caso real. Ese desfase se refleja también en la fase decreciente de la curva, en la etapa de enfriamiento. Se observa al igual que la curva de la temperatura CV simulada con *Aptenia cordifolia* que la CV simulada con *Hyalis argentea* intenta imitar, aunque suavemente -a diferencia de la medida- la curva de temperatura exterior.

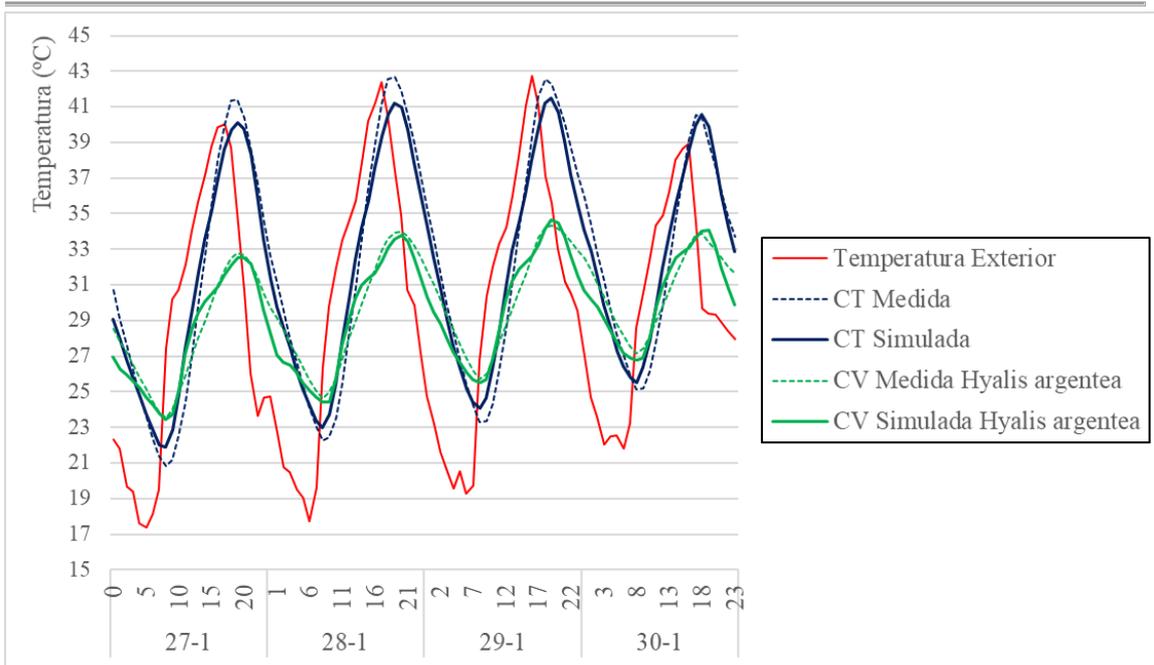
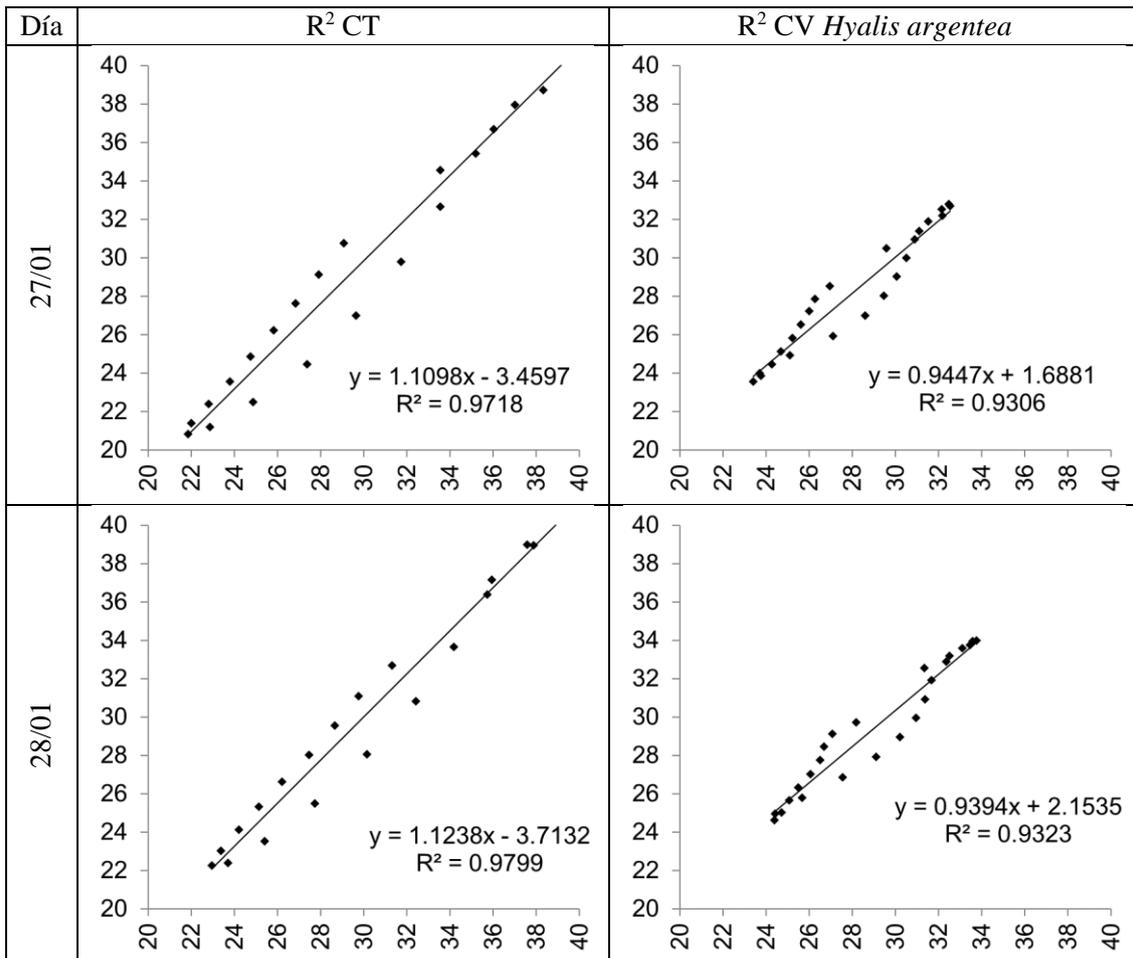


Figura 63: Relación entre curvas de temperatura medidas y simuladas con EnergyPlus para el caso con cubierta tradicional y para el caso con cubierta vegetada con Hyalis argentea



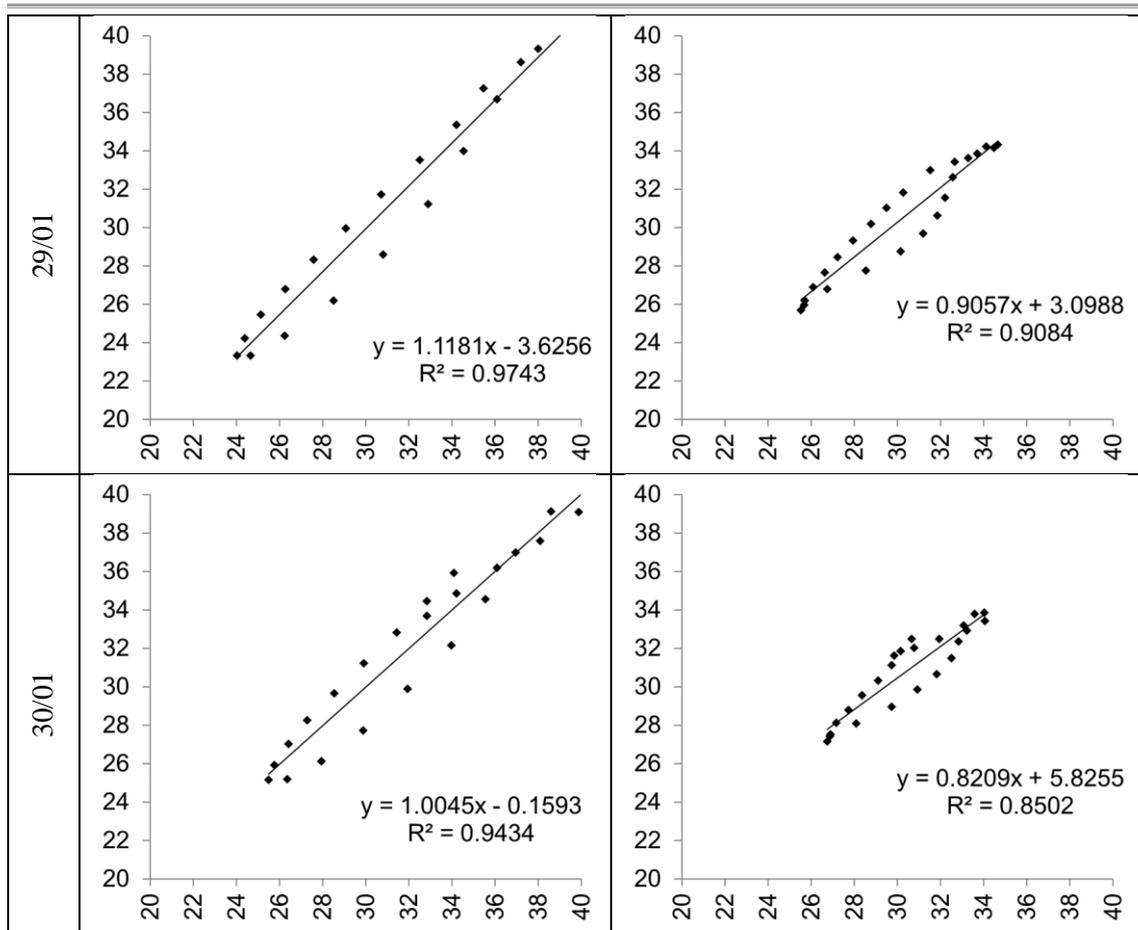


Tabla 25: Ajuste de los días simulados con EnergyPlus para el caso con cubierta tradicional y para el caso con cubierta vegetada con *Hyalis argentea*

A.2. Consumo energético en box experimentales

A.2.1. Caso Cubierta tradicional sin aislar versus cubierta vegetada con *Aptenia cordifolia*

El consumo energético en J/h se ha obtenido por simulación con EnergyPlus para el caso con cubierta tradicional sin aislar, un escenario adicional de cubierta tradicional aislada y para la cubierta vegetada con *Aptenia cordifolia* (Figura 64). Se puede observar en esta gráfica que ya sea, el uso de un material aislante como poliestireno expandido de baja densidad o la incorporación de una cubierta vegetada a una losa de hormigón armado sin aislar, genera una significativa reducción en el consumo de energía. Esta reducción comienza aproximadamente 3 horas después del amanecer, cerca de las 9 hs. En ese momento ambas mejoras en la cubierta -vegetar o aislar- tienden a despegarse de la curva de una cubierta tradicional sin aislar, disminuyendo su velocidad de cambio significativamente. Si bien la hora de máximo consumo es coincidente para las tres curvas, a partir de este momento y comenzando la etapa de enfriamiento, las tecnologías propuestas presentan una abrupta caída en sus curvas, facilitando la disminución del consumo energético, para llegar al menos dos horas antes al consumo “cero” que el caso con cubierta tradicional sin aislar. La curva de del caso con cubierta tradicional aislada mejora la situación de base o control de la cubierta sin aislar, pero esta mejora es aún mayor -aunque levemente- con el uso de la cubierta vegetada con *Aptenia cordifolia*. Este

último fenómeno mencionado, es más notorio en la segunda parte del día, es decir, cuando las temperaturas empiezan a disminuir luego del horario de la máxima.

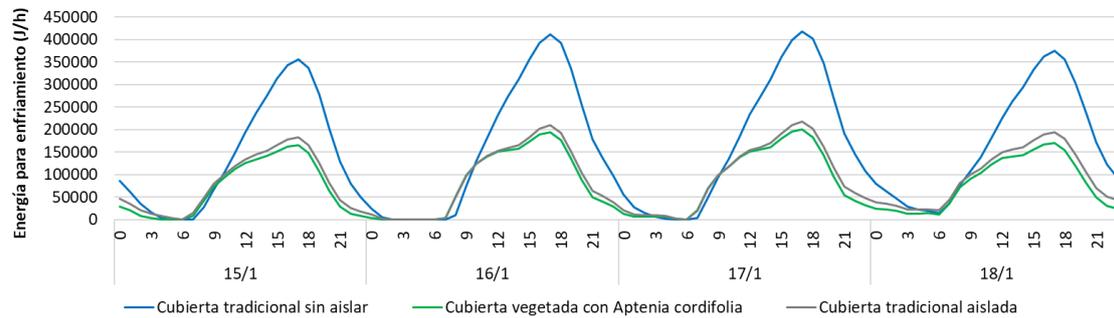


Figura 64: Consumos de energía en (J/h) para el caso con cubierta tradicional sin aislar, aislada y con cubierta vegetada con *Aptenia cordifolia* calculados con EnergyPlus

Los datos presentados en la Figura 64 se procesaron en la Tabla 26 en forma diaria. Fueron convertidos a kWh y promediados los días para obtener un consumo energético diario característico. Se puede observar que aislar una cubierta tradicional con 50 mm de espesor de poliestireno expandido de baja densidad permite un ahorro energético del 45%. Para el caso de la cubierta vegetada con *Aptenia cordifolia* se puede observar de la tabla un ahorro energético del 50 % respecto al consumo del caso con CTSA y de un 11% al compararla con el caso con CTA. Por lo cual, la incorporación de una cubierta vegetada con *Aptenia cordifolia* reduce los consumos de energía de una cubierta tradicional, incluso si se la compara con una cubierta tradicional aislada. Las tablas completas de los datos obtenidos en la Tabla 26 se encuentran en el Anexo-II de Respuesta térmica.

Día	Consumo de energía para refrigeración en box con CTSA Simulado (J/h)	kWh
15/1	3344616.6	0.93
16/1	3796442.7	1.05
17/1	4034207.3	1.12
18/1	3951211.8	1.10
	Promedio=	1.05

Día	Consumo de energía para refrigeración en box con CTA Simulado (J/h)	kWh
15/1	1910222.1	0.53
16/1	2107351.6	0.59
17/1	2273182.2	0.63
18/1	2287499.8	0.64
	Promedio=	0.60

Día	Δ Energía= Energía consumida con CTSA-Energía consumida con CV con <i>Aptenia cordifolia</i>	kWh
15/1	1700130.7	0.47
16/1	1836467.1	0.51
17/1	1951725.1	0.54
18/1	2034106.2	0.57
	Promedio=	0.52
	Ahorro en (%)	49.7

Día	Δ Energía= Energía consumida con CTA-Energía consumida con CV con <i>Aptenia cordifolia</i>	kWh
15/1		265736.11 0.07
16/1		147375.99 0.04
17/1		190700.01 0.05
18/1		370394.18 0.10
	Promedio=	0.07
	Ahorro en (%)	11.3

Tabla 26: Cálculo de ahorro energético con la implementación de cubierta vegetada con *Aptenia cordifolia* en box experimental

A.2.2. Caso Cubierta tradicional sin aislar versus cubierta vegetada con *Hyalis argentea*

El consumo energético en J/h se ha obtenido por simulación con EnergyPlus para el caso con cubierta tradicional sin aislar, un escenario adicional de cubierta tradicional aislada y para la cubierta vegetada con *Hyalis argentea* (Figura 65). Se puede observar en esta gráfica que ya sea, el uso de un material aislante como poliestireno expandido de baja densidad o la incorporación de una cubierta vegetada a una losa de hormigón armado sin aislar, genera una significativa reducción en el consumo de energía. Esta reducción comienza aproximadamente 3 horas después del amanecer, cerca de las 9 hs. En ese momento ambas mejoras en la cubierta -vegetar o aislar- tienden a despegarse de la curva de una cubierta tradicional sin aislar, disminuyendo su velocidad de cambio significativamente. Si bien la hora de máximo consumo es coincidente para las tres curvas, a partir de este momento y comenzando la etapa de enfriamiento, las tecnologías propuestas presentan una abrupta caída en sus curvas, facilitando la disminución del consumo energético, para llegar al menos una hora antes al consumo “cero” que el caso con cubierta tradicional sin aislar. La curva del caso con cubierta tradicional aislada mejora la situación de base o control de la cubierta sin aislar, y esta mejora es aún mayor -aunque levemente- en la etapa de calentamiento al compararla con la incorporación de la cubierta vegetada con *Hyalis argentea*. Este último fenómeno mencionado, ocurre hasta el horario de la máxima temperatura, cuando las curvas decaen y comienza el periodo de enfriamiento, con ambas tecnologías -aislar o vegetar- se obtiene el mismo resultado, ya que las curvas se superponen en ese periodo del día.

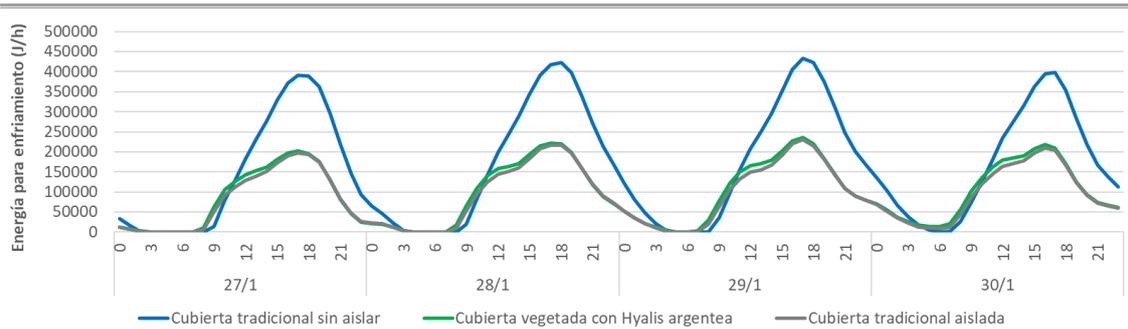


Figura 65: Consumos de energía en (J/h) para el caso con cubierta tradicional sin aislar, aislada y con cubierta vegetada con *Hyalis argentea* calculados con EnergyPlusTabla 27 en forma diaria. Fueron convertidos a kWh y promediados los días para obtener un consumo energético diario característico. Se puede que aislar la cubierta tradicional con 50 mm de espesor de poliestireno expandido de baja densidad permite un ahorro energético del 49%. Para el caso de la cubierta vegetada con *Hyalis argentea* se puede observar de la tabla un ahorro energético del 41 % respecto al consumo del caso con CTSA y un consumo superior en un 6% al compararla con el caso con CTA. Por lo cual, la incorporación de una cubierta vegetada con *Hyalis argentea* reduce los consumos de energía comparada con una cubierta tradicional sin aislar, pero no es más eficiente en términos de ahorro energético que la incorporación de una capa aislante de poliestireno expandido de baja densidad a la cubierta de losa tradicional.

Estos resultados se contraponen a los de la cubierta vegetada con *Aptenia cordifolia*, lo cual podría deberse a las temperaturas exteriores ya que se midieron en periodos diferentes en los ensayos experimentales o a las características intrínsecas de las especies o de la capa de cultivo. Las tablas completas de los datos obtenidos en la Tabla 27 se encuentran en el Anexo-II de Respuesta térmica.

Día	Consumo de energía para refrigeración en box con CTSA Simulado (J/h)	kWh
-----	--	-----

27/1		3560356.5	0.99
28/1		4076658.2	1.13
29/1		4232573.3	1.18
30/1		4026059.1	1.12
		Promedio=	1.10
Día	Consumo de energía para refrigeración en box con CTA Simulado (J/h)		kWh
15/1		1916827.2	0.53
16/1		2251304.3	0.63
17/1		2370838.8	0.66
18/1		2316187.2	0.64
		Promedio=	0.61
Día	Δ Energía= Energía consumida con CTSA-Energía consumida con CV con <i>Hyalis argentea</i>		kWh
27/1		1542941.9	0.43
28/1		1711349.4	0.48
29/1		1721382.7	0.48
30/1		1538048.3	0.43
		Promedio=	0.45
		Ahorro en (%)	40.98
Día	Δ Energía= Energía consumida con CTA-Energía consumida con CV con <i>Hyalis argentea</i>		kWh
27/1		-100587.4	-0.03
28/1		-114004.4	-0.03
29/1		-140351.8	-0.04
30/1		-171823.7	-0.05
		Promedio=	-0.04
		Ahorro en (%)	-5.95

Tabla 27: Cálculo de ahorro energético con la implementación de cubierta vegetada con *Hyalis argentea* en box experimental

B. ESCALA URBANA

B.1. Ajuste del modelo de simulación

Para ajustar el modelo teórico, la curva de temperatura del aire simulada por ENVI-met 3.1 (Sp) se contrastó con la curva de temperatura del aire real obtenida a partir de los datos registrados desde un punto fijo observado (Op) ubicado dentro del área de estudio.

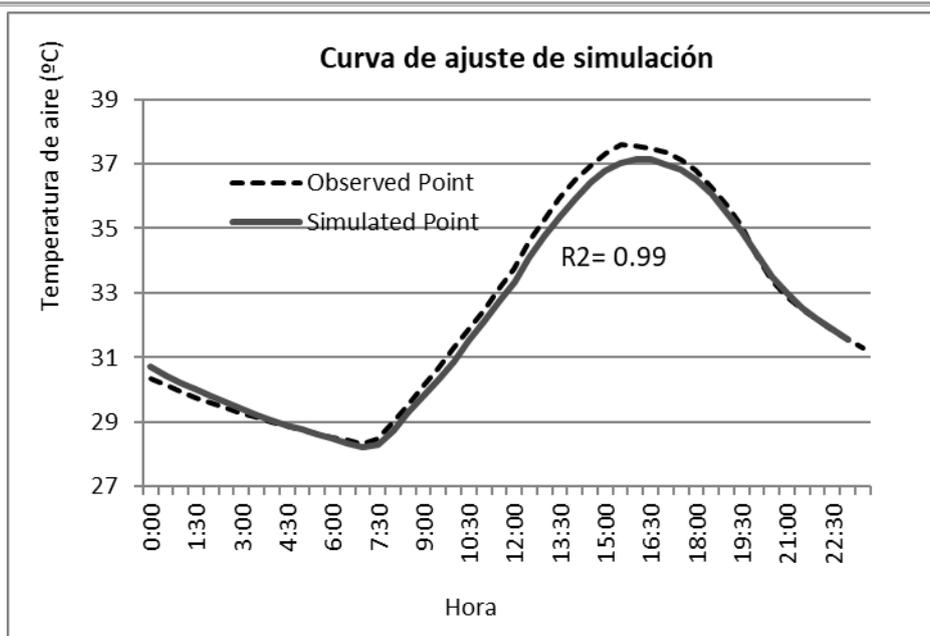


Figura 66: Curva de ajuste entre el punto de observación de referencia (Op) y el punto simulado numéricamente por ENVI-met (Sp)

Temperatura	Observed Point	Simulated Point
Máxima	37.6	37.1
Media	32.4	32.3
Mínima	28.3	28.2

Tabla 28: Ajuste entre el punto de observación de referencia (Op) y el punto simulado numéricamente por ENVI-met (Sp)

La Figura 66 y la Tabla 28 muestran los resultados de la comparación de la curva de temperatura del aire obtenida por la simulación (Sp) y la curva real medida del día evaluado (Op). La curva simulada (Sp) tiene una correspondencia similar con la curva observada (Op). $R^2 = 0,99$.

B.2. Comportamiento térmico de escenarios urbanos simulados

Se presenta la variación del comportamiento térmico para cada uno de los escenarios simulados. Su desempeño se contrasta con el caso base en los escenarios de baja densidad. Los comportamientos de todas las situaciones analizadas se presentan en la Figura 67, Figura 68, Figura 69 y Figura 70.

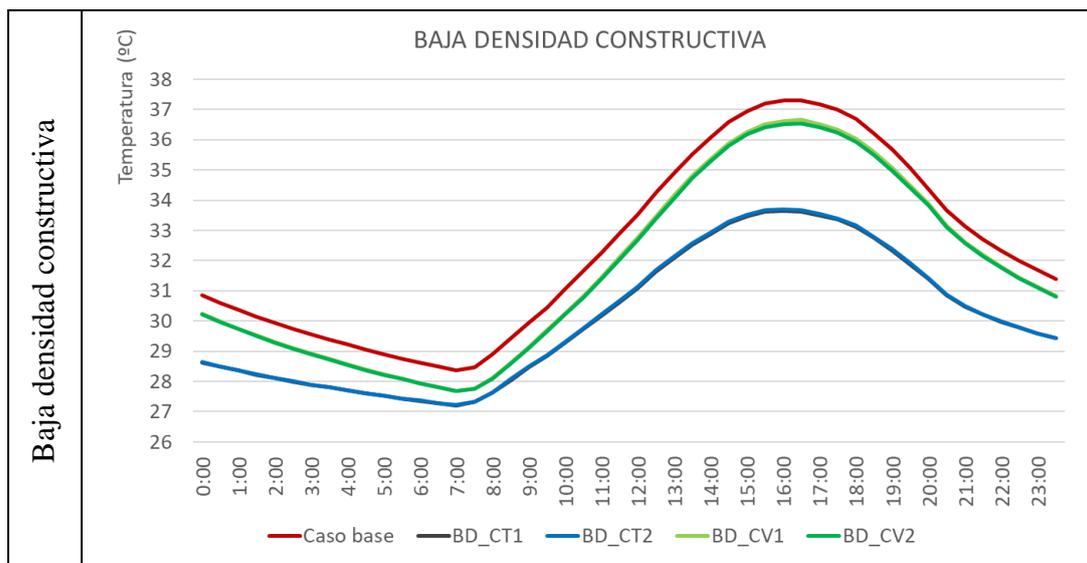
Los resultados del modelo ENVI-met muestran que, para baja densidad constructiva, a escala urbana, y partiendo de un caso de techo de madera con tejas rojas (caso base), al cambiarlas por cubiertas vegetadas (BD_CV1 y BD_CV2) sobre losa de hormigón armado, las condiciones de habitabilidad térmica mejoran en los canales viales. Cuando en los escenarios se modifica nuevamente la tecnología de cubierta y se utiliza en lugar de cubiertas vegetadas, losas de hormigón armado con terminación de membrana de aluminio, las mejoras en la habitabilidad térmica son aún mayores (Figura 67). Este fenómeno se evidencia con mayor magnitud en el periodo de mayor temperatura, aproximadamente de 12 a 20 hs. En cambio, de 20 a 12 hs las curvas tienden a aproximarse. Se evidencia que, para baja densidad constructiva, no hay diferencias entre

los tipos de cubierta vegetada –*Aptenia cordifolia* o *Hyalis argentea*- ni entre los tipos de cubierta tradicional -sin aislar o aislada-.

En las curvas de temperatura de los escenarios de media densidad constructiva, el fenómeno es similar al descrito para baja densidad, pero las curvas temperatura de los escenarios con cubiertas vegetadas o con cubiertas tradicionales se encuentran un grado por debajo de las curvas para esos escenarios en baja densidad, este efecto es más visible en los sectores de mayor temperatura. Esto puede deberse a que, al aumentar la densidad, existe mayor sombreadamiento o, dicho de otro modo, menor ganancia solar y las temperaturas descienden un grado Celsius.

Al observar las curvas de temperatura en los escenarios de alta densidad constructiva, al igual que en los escenarios de media densidad, las curvas de temperatura muestran, que están al menos un grado por debajo de los mismos escenarios en media densidad, pero este efecto es mayor que cuando se pasa de los escenarios de baja a media densidad.

Además, a medida que aumenta la densidad constructiva en los escenarios, para los cuatros casos, las curvas tienden aproximarse e imitarse en su forma. Es decir, al densificar, las diferencias en temperatura en los canales viales a nivel urbano disminuyen usando estas terminaciones de cubierta propuestas.



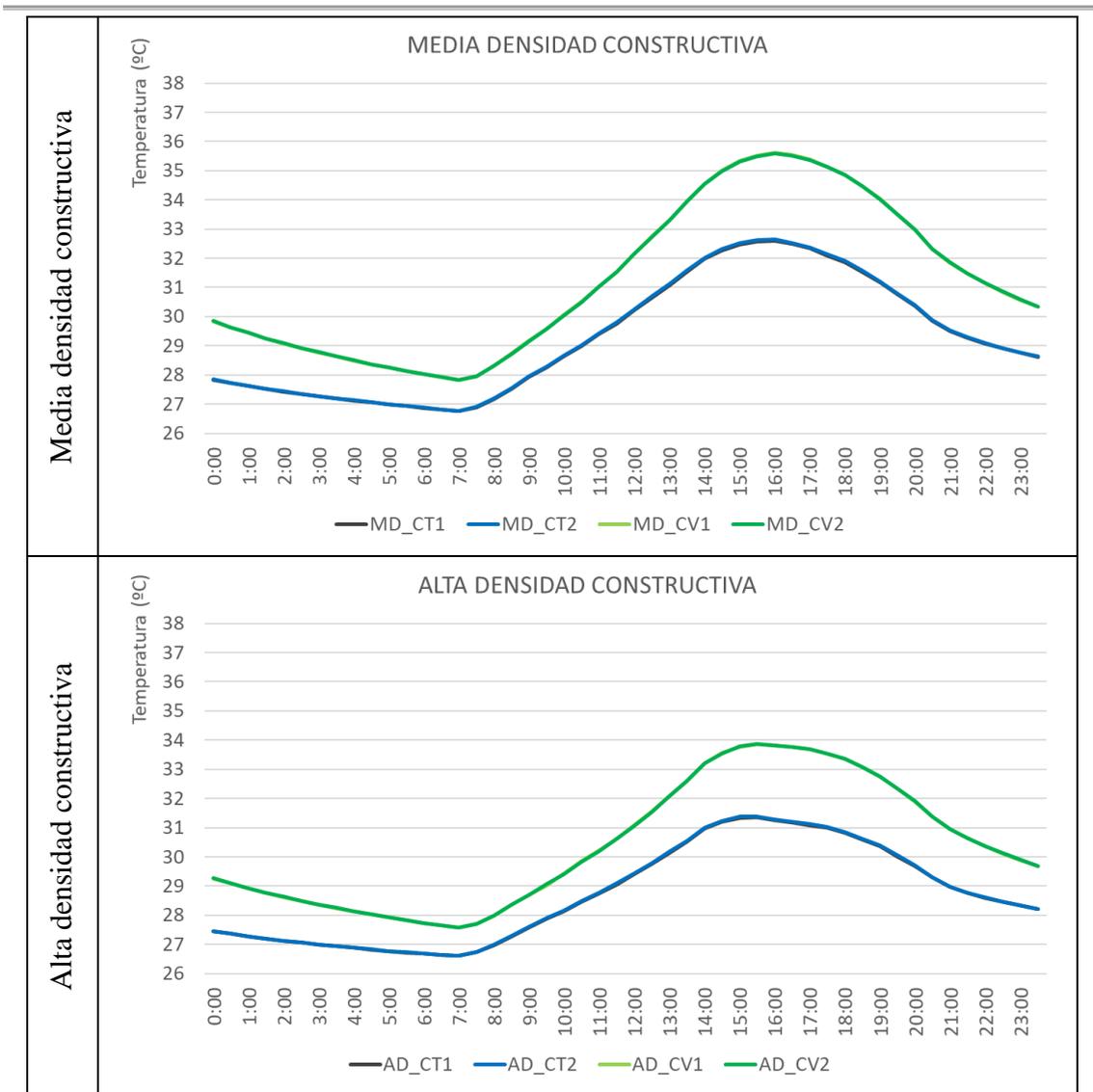


Figura 67: Curvas de temperatura de aire para caso base y escenarios propuestos a 2 metros de altura.

Con respecto a las diferencias de temperaturas máximas, medias y mínimas, entre el caso base y los cuatro escenarios propuestos (Figura 68), se observa que en baja densidad constructiva, se obtienen mayores diferencias (mayores disminuciones de temperatura) en los escenarios con cubierta tradicional (BD_CT1 y BD_CT2) que en los escenarios con cubiertas vegetadas (BD_CV1 y BD_CV2). Pero entre cada par de escenarios no se encuentra diferencia. Además, en los escenarios con CV no se diferencian los ΔT entre temperaturas máximas, medias o mínimas. Las mayores diferencias se encuentran en las temperaturas máximas -Temperatura máxima BD_CT 3 °C menor que los escenarios con CV-. El mismo patrón se da para las temperaturas medias -con 2 °C de diferencia- y en las temperaturas mínimas -con diferencias menores a 0.5 °C-. Es decir, las mayores diferencias entre pares de escenarios con respecto al caso base se obtienen en las temperaturas máximas.

Para los escenarios de media densidad las diferencias que se describieron para baja densidad siguen el mismo patrón, pero son aún mayores -los ΔT en todos los casos-, y además se observa que para los escenarios con CV se encuentran diferentes ΔT entre temperaturas máximas, medias y mínimas, encontrándose mayores beneficios en las

temperaturas máximas. Los valores en las diferencias entre pares -CT y CV- para media densidad son iguales a los descriptos para baja densidad en las temperaturas máximas y medias, pero las temperaturas mínimas se diferencian en al menos 1 °C (versus 0.5 en baja densidad). Es decir, que se mantienen las diferencias al igual que en baja densidad, aunque la magnitud de todos los escenarios es mayor con respecto al ΔT , pero las diferencias en las temperaturas mínimas aumentan.

La alta densidad constructiva maximiza los beneficios de las cubiertas vegetadas al compararla con media y baja densidad. En estos escenarios, al comparar entre pares -CT y CV- se puede observar que no sólo han aumentado las magnitudes de todos los ΔT , sino que las diferencias entre CT y CV disminuyen, aproximándose los beneficios térmicos al aumentar la densidad constructiva. Las diferencias entre temperaturas máximas son como máximo de 2.5 °C mayores con CV que con CT, las temperaturas medias son 1.7 °C mayores con CV que con CT y las temperaturas mínimas son menores a 1 °C de diferencia entre ambos paquetes tecnológicos.

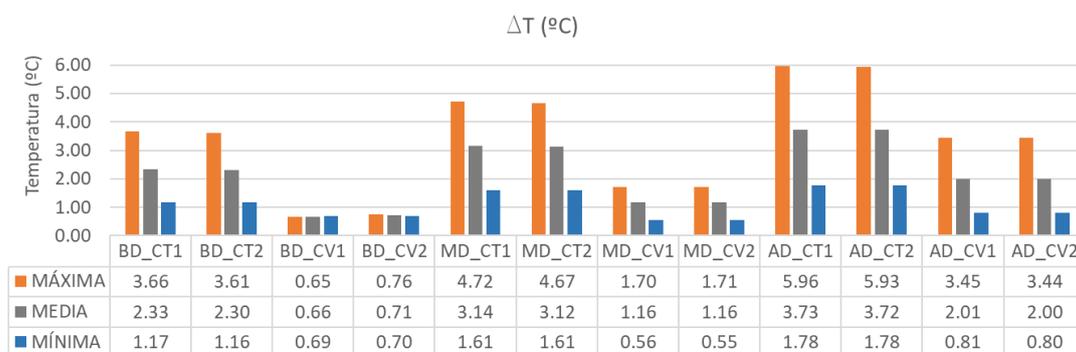
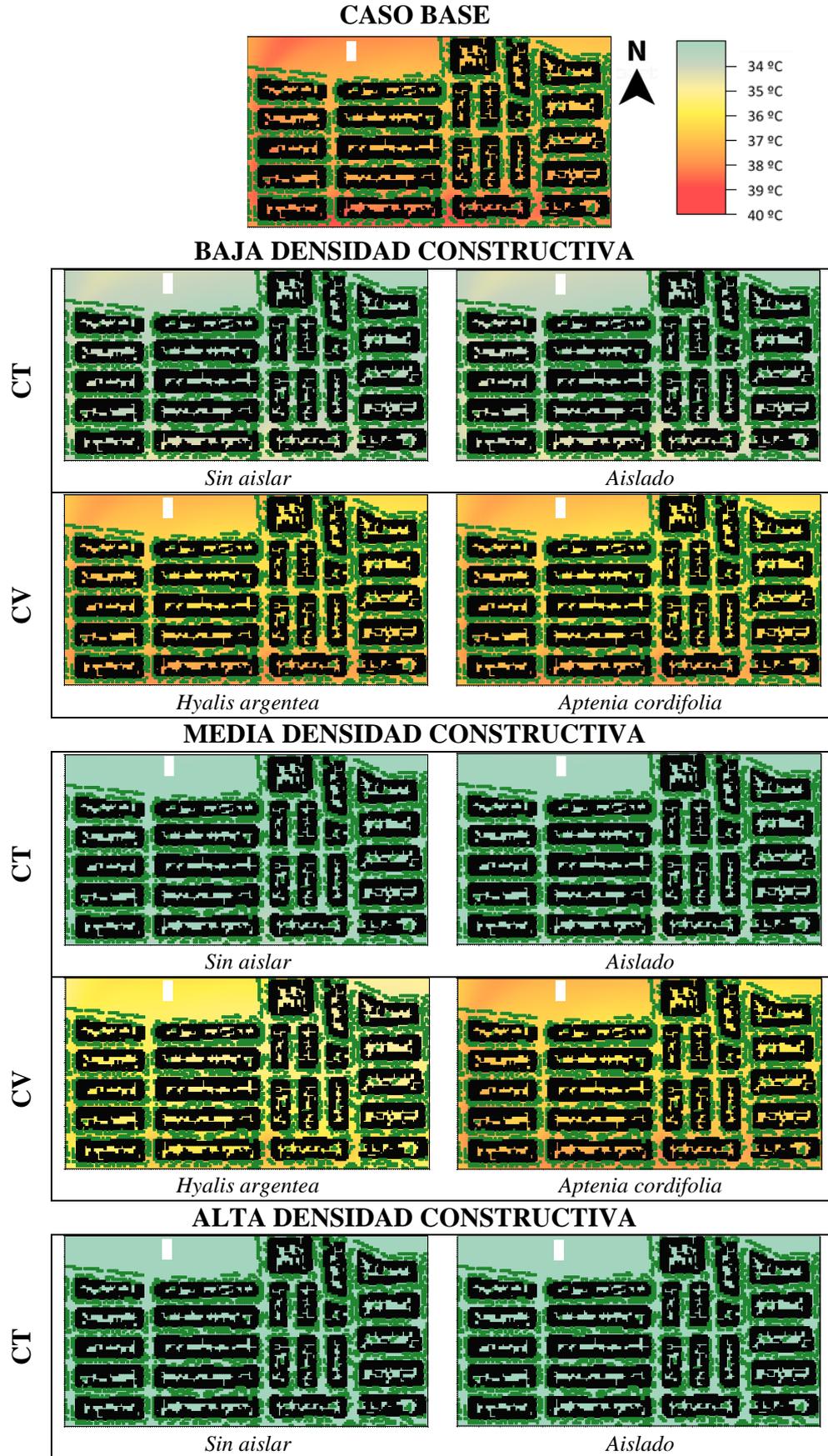


Figura 68: Diferencias entre la temperatura de aire del caso base y los escenarios propuestos.

El comportamiento térmico del caso base y de los 12 escenarios (4 casos por 3 densidades constructivas) de las tramas urbanas se observa en la Figura 69 para las temperaturas máximas y en la Figura 70 para las temperaturas mínimas. Los cortes con los cuales se han realizado éstas gráficas térmicas son a 2.4 metros de altura. Las diferencias entre los dos casos con cubierta vegetada y entre los dos casos con cubiertas tradicionales son mínimas y se podrían considerar despreciables. Se puede observar, con la escala colorimétrica, que a medida que aumenta la densidad constructiva las temperaturas de toda la trama disminuyen para todos los escenarios, y en particular destaca que la diferencia entre los dos escenarios con cubierta tradicional y los dos escenarios con cubierta vegetada disminuyen la diferencia con el aumento de la densificación constructiva. Estos resultados demuestran que, desde un punto de vista de desempeño térmico urbano, la aplicación de cubiertas vegetadas es más competitiva en comparación con cubiertas tradicionales con membrana de aluminio (alto albedo) en alta densidad que en media y baja densidad constructiva. En la Figura 70 se observa que la diferencia entre tecnologías de cubiertas e incluso entre densidades edilicias es mínima con respecto a las temperaturas mínimas, y todas las tecnologías de cubierta superan el comportamiento térmico del caso base.



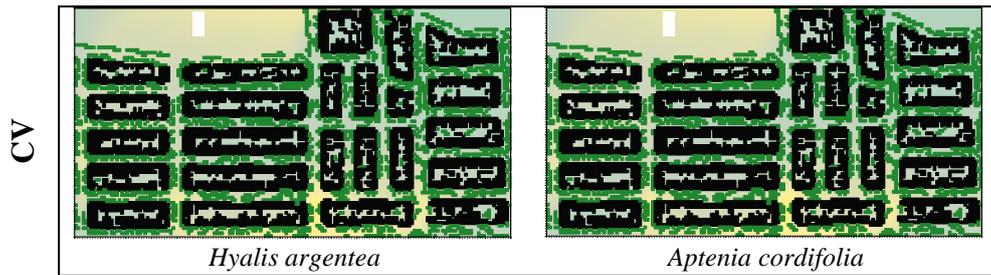
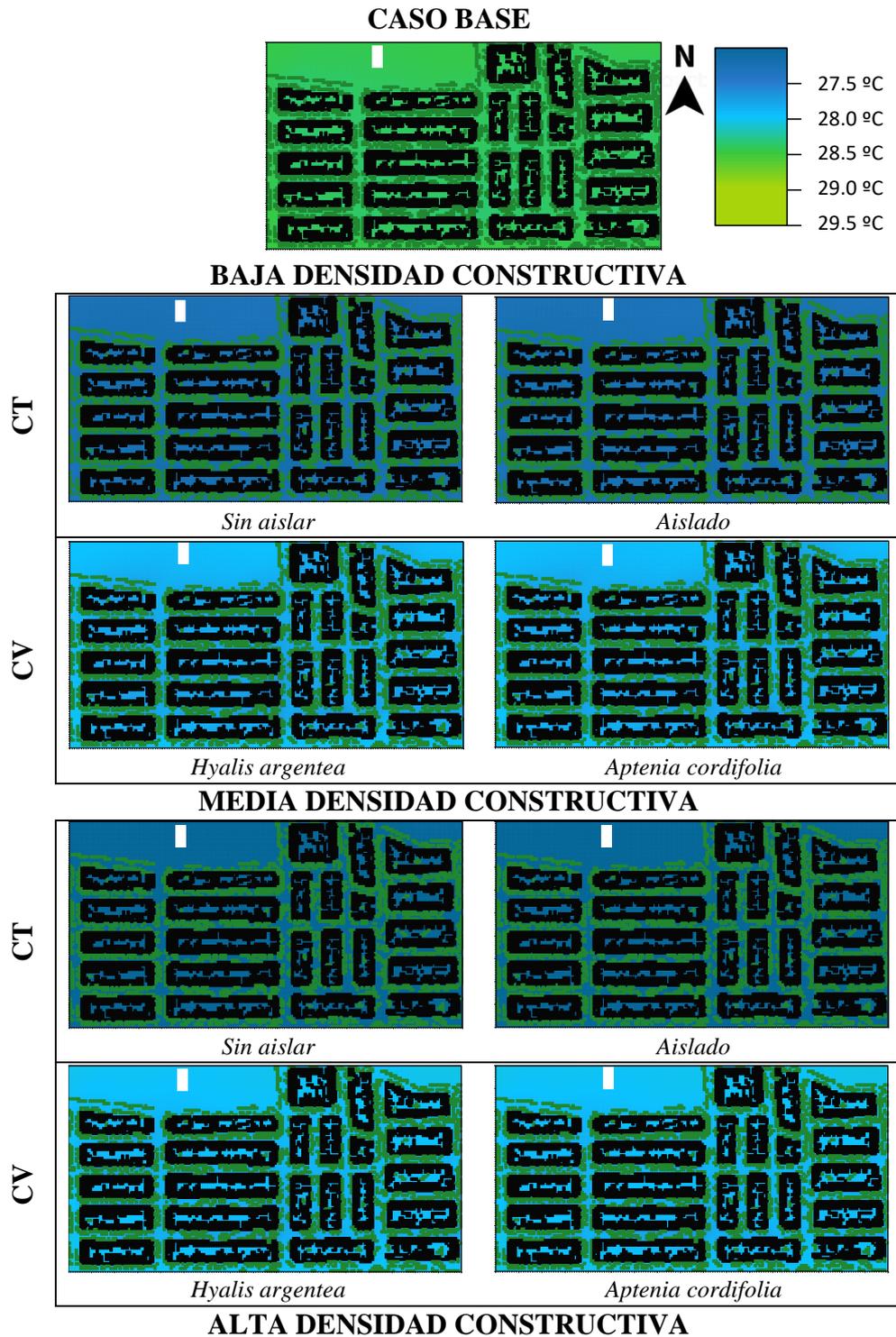


Figura 69: Temperaturas máximas de aire a 2 metros de altura para el caso base y para los escenarios de simulación propuestos.



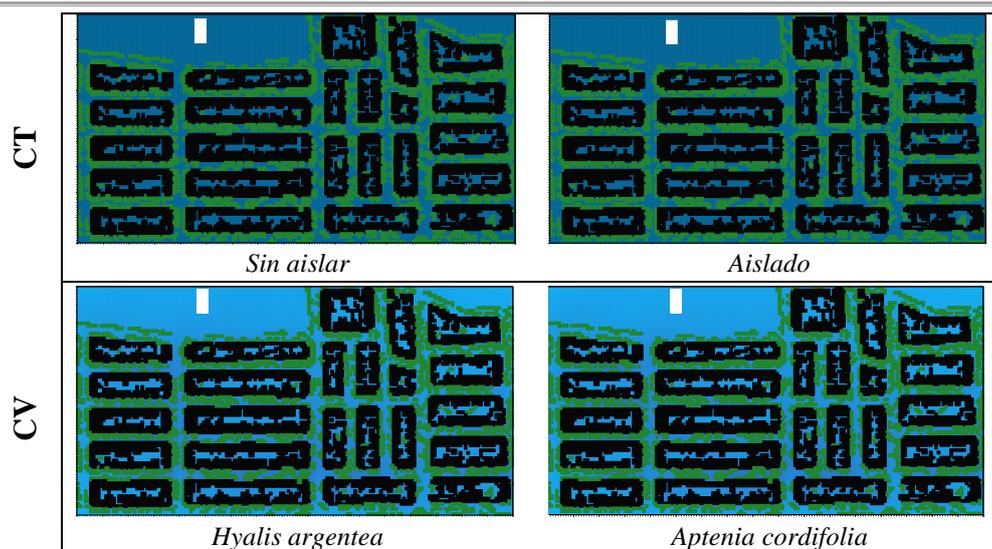


Figura 70: Temperaturas mínimas de aire a 2 metros de altura para el caso base y para los escenarios de simulación propuestos.

II-Conclusiones de respuesta térmica de cubiertas vegetadas a través de herramientas de predicción del microclima urbano y edilicio

A. ESCALA EDILICIA

Los ajustes diarios entre las curvas de temperatura simulados y las curvas de datos obtenidos por mediciones en ensayos experimentales muestran R^2 superiores a 0.85 en todos los casos.

Con respecto a las tecnologías de cubierta, el uso de un material aislante como poliestireno expandido de baja densidad o la incorporación de una cubierta vegetada a una losa de hormigón armado sin aislar, genera una significativa reducción en el consumo de energía. Esta reducción comienza aproximadamente 3 horas después del amanecer, cerca de las 9 hs. En ese momento ambas mejoras en la cubierta -vegetar o aislar- tienden a despegarse de la curva de una cubierta tradicional sin aislar, disminuyendo su velocidad de cambio significativamente. Si bien la hora de máximo consumo es coincidente para las tres curvas, a partir de este momento y comenzando la etapa de enfriamiento, las tecnologías propuestas presentan una abrupta caída en sus curvas, facilitando la disminución del consumo energético, para llegar al menos dos horas antes al consumo “cero” que el caso con cubierta tradicional sin aislar.

La curva del caso con cubierta tradicional aislada mejora la situación de base o control de la cubierta sin aislar, pero esta mejora es aún mayor -aunque levemente- con el uso de la cubierta vegetada con *Aptenia cordifolia*. Este último fenómeno mencionado, es más notorio en la segunda parte del día, es decir, cuando las temperaturas empiezan a disminuir luego del horario de la máxima. En cambio, con la incorporación de la cubierta vegetada con *Hyalis argentea*, la curva de temperatura comparada con la del caso con cubierta tradicional aislada es levemente menos efectiva en la etapa de calentamiento, aunque este fenómeno no se verifica en la etapa de enfriamiento.

Para los box experimentales, aislar la cubierta tradicional con 50 mm de espesor de poliestireno expandido de baja densidad permite un ahorro energético del 45%. Para el

caso de la cubierta vegetada con *Aptenia cordifolia* se logra un ahorro energético del 50 % respecto al consumo del caso con CTSA y de un 11% al compararla con el caso con CTA. Por lo cual, la incorporación de una cubierta vegetada con *Aptenia cordifolia* reduce los consumos de energía de una cubierta tradicional, incluso si se la compara con una cubierta tradicional aislada.

En cambio, en las comparaciones con la cubierta vegetada con *Hyalis argentea*, se puede observar que aislar la cubierta tradicional con 50 mm de espesor de poliestireno expandido de baja densidad permite un ahorro energético del 49%. Para el caso de la cubierta vegetada con *Hyalis argentea* se puede observar un ahorro energético del 41 % respecto al consumo del caso con CTSA y un consumo superior en un 6% al compararla con el caso con CTA. Por lo cual, la incorporación de una cubierta vegetada con *Hyalis argentea* reduce los consumos de energía comparada con una cubierta tradicional sin aislar, pero no es más eficiente en términos de ahorro energético que la incorporación de una capa aislante de poliestireno expandido de baja densidad a la cubierta de losa tradicional. Estos resultados se contraponen a los de la cubierta vegetada con *Aptenia cordifolia*, lo cual podría deberse a las temperaturas exteriores ya que se midieron en periodos diferentes en los ensayos experimentales o a las características intrínsecas de las especies o de la capa de cultivo.

Los resultados sugieren, que la selección de las especies vegetales a incorporar en las cubiertas vegetadas, puede definir el consumo energético interior de los edificios, por lo cual, este criterio debe tenerse en cuenta en la etapa de diseño de una cubierta vegetada.

B. ESCALA URBANA

En este estudio ha utilizado un enfoque de modelado integrado mediante el enlace EnergyPlus y ENVI-met en el estudio de la reducción de la temperatura urbana mediante techos verdes y frescos en un contexto árido. Se proporcionaron herramientas para los procedimientos de co-simulación, donde el software EnergyPlus calcula los parámetros térmicos de las diferentes tecnologías de techo que se aplicarán en las simulaciones urbanas con ENVI-met. El objetivo es utilizar el potencial de cada software para obtener resultados más ajustados y confiables. La curva de temperatura del aire obtenida por la simulación y la curva real medida del día evaluado presentan una correspondencia con $R^2 = 0,99$.

Para baja densidad constructiva, a escala urbana, la incorporación de cubiertas vegetadas sobre losa de hormigón armado, mejoran las condiciones de habitabilidad térmica en los canales viales. En la incorporación de terminaciones de membrana de aluminio, las mejoras en la habitabilidad térmica son aún mayores. Este fenómeno se evidencia con mayor magnitud en el periodo de mayor temperatura, aproximadamente de 12 a 20 hs. En cambio, de 20 a 12 hs las tecnologías de cubierta se comportan de forma similar. Se evidencia que, para baja densidad constructiva, no hay diferencias entre los tipos de cubierta vegetada -*Aptenia cordifolia* o *Hyalis argentea*- ni entre los tipos de cubierta tradicional -sin aislar o aislada- en la determinación de la temperatura de los canales viales a escala urbana.

Las temperaturas de los escenarios de media densidad constructiva, el fenómeno es similar al descrito para baja densidad, pero las curvas temperatura de los escenarios con

cubiertas vegetadas o con cubiertas tradicionales se encuentran un grado por debajo de las curvas para esos escenarios en baja densidad, este efecto es más visible en los sectores de mayor temperatura. Esto puede deberse a que, al aumentar la densidad, existe mayor sombreado o, dicho de otro modo, menor ganancia solar y las temperaturas descienden un grado Celsius. En alta densidad constructiva, al igual que en los escenarios de media densidad, las curvas de temperatura muestran, que están al menos un grado por debajo de los mismos escenarios en media densidad, pero este efecto es mayor que cuando se compara escenarios de baja a media densidad. Es decir, al densificar, las diferencias en temperatura en los canales viales a nivel urbano disminuyen usando estas terminaciones de cubierta propuestas.

Las mayores diferencias se encuentran en las temperaturas máximas -Temperatura máxima en el escenario de baja densidad con cubiertas tradicionales 3 °C menor que los escenarios con cubiertas vegetadas-. El mismo patrón se da para las temperaturas medias -con 2 °C de diferencia- y en las temperaturas mínimas -con diferencias menores a 0.5 °C-. Es decir, las mayores diferencias entre escenarios con respecto al caso base se obtienen en las temperaturas máximas.

Para los escenarios de media densidad las diferencias que se describieron para baja densidad siguen el mismo patrón, pero son aún mayores -los ΔT en todos los casos-, y además se observa que para los escenarios con cubiertas vegetadas se encuentran diferentes ΔT entre temperaturas máximas, medias y mínimas, encontrándose mayores beneficios en las temperaturas máximas. Los valores en las diferencias entre pares -CT y CV- para media densidad son iguales a los descriptos para baja densidad en las temperaturas máximas y medias, pero las temperaturas mínimas se diferencian en al menos 1 °C (versus 0.5 en baja densidad). Es decir, que se mantienen las diferencias al igual que en baja densidad, aunque la magnitud de todos los escenarios es mayor con respecto al ΔT , pero las diferencias en las temperaturas mínimas aumentan.

La alta densidad constructiva maximiza los beneficios de las cubiertas vegetadas al compararla con la media y baja densidad. En estos escenarios, al comparar entre pares -CT y CV- se puede observar que no sólo han aumentado las magnitudes de todos los ΔT , sino que las diferencias entre CT y CV disminuyen, aproximándose los beneficios térmicos al aumentar la densidad constructiva. Las diferencias entre temperaturas máximas son como máximo de 2.5 °C mayores con CV que con CT, las temperaturas medias son 1.7 °C mayores con CV que con CT y las temperaturas mínimas son menores a 1 °C de diferencia entre ambos paquetes tecnológicos.

Estos resultados demuestran que, desde un punto de vista de desempeño térmico urbano, la aplicación de cubiertas vegetadas es más competitiva en comparación con cubiertas tradicionales con membrana de aluminio (alto albedo) en alta densidad que en media y baja densidad constructiva.

Este trabajo muestra que las tecnologías tradicionales de cubierta podrían mejorarse con la incorporación de membranas reflectivas -de aluminio- o cubiertas vegetadas. Ambas tecnologías probadas en esta investigación demostraron efectos beneficiosos similares en términos de temperatura del aire urbano. Sin embargo, los techos verdes también brindan servicios ecosistémicos y beneficios térmicos a los edificios.

Como conclusión final, la combinación de variables como la selección de especies de plantas utilizadas en techos verdes en relación con los recursos climáticos locales y diversas tecnologías de cubierta nos permitiría obtener diferentes eficiencias energéticas a nivel de objeto, edificio y a escala urbana. El ajuste de las herramientas de predicción mediante la simulación que vincula modelos a diferentes escalas, como EnergyPlus y ENVI-met, facilitará tanto el diseño de edificios sostenibles como la planificación urbana.

CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

A. POTENCIALIDAD DE ENVERDECIMIENTO DEL ÁREA METROPOLITANA DE MENDOZA (AMM) CON LA INCORPORACIÓN DE CUBIERTAS VEGETADAS

La implementación de techos verdes en áreas urbanas es una opción viable para mejorar las condiciones ambientales del hábitat construido. El abordaje científico de esta temática muestra que las tecnologías de vegetación insertas en áreas urbanas incrementan sus servicios ecosistémicos y en particular mejoran el desempeño ambiental de los edificios (Berndtsson, 2010). Numerosos autores han descripto y cuantificado los beneficios de los techos verdes asociados a la determinación de las temperaturas superficiales de las cubiertas verdes, la temperatura del aire en espacios interiores y espacios urbanos mediatos, con el objeto de determinar el impacto de los sistemas conformados por distintas especies vegetales en la demanda de energía para refrigeración en verano y para calefacción en invierno (La Roche, 2009). El alcance y la extensión de estos beneficios varía en función del clima, la tecnología de la envolvente edilicia y las características de la cubierta verde que condicionan el mecanismo de enfriamiento preponderante (Cameron et al., 2014).

En el área de estudio, dada la condicionante árida del emplazamiento, se planteó la necesidad de avanzar en torno al estudio y desarrollo sistemas de cubiertas vegetadas mediante el uso de especies de bajo requerimiento hídrico y adaptación al ambiente y al sistema. De esta forma, se logró el diseño de una tecnología verde de cubierta que incorpora masa vegetal al espacio urbano-edificio que mitiga los efectos de la antropización del medio y contribuye a valorizar su calidad energética y ambiental, sin comprometer un recurso escaso y altamente demandado. Es decir, esta tesis brinda un aporte significativo al estado del conocimiento relacionado a la selección de especies apropiadas para integrar cubiertas vegetadas en zonas áridas que a su vez permitan el mejor desempeño termo-energético a escala edilicia y urbana.

En el AMM y en particular para la alta densidad constructiva, se cuenta con un bajo porcentaje promedio de espacio abierto (13%), en relación al espacio cubierto (87%) (Flores Asin et al., 2013). El alto porcentaje verificado para techos planos, indica la alta disponibilidad existente para la potencial incorporación de cubiertas vegetadas. Justificado, además, por la baja proporción de espacio abierto o presencia de vacíos urbanos. Esta situación indicaría que no existe posibilidad de aumentar los espacios verdes si no es mediante la incorporación de nuevas tecnologías como cubiertas o muros vegetados. El ajardinado o naturación de techos planos, por lo tanto, representa una de las estrategias viables para la incorporación de vegetación al ambiente construido en el AMM.

Las conclusiones generales del desarrollo y análisis de los ensayos experimentales para tecnologías de cubiertas vegetadas se presentan en torno a las repuestas biológicas de las distintas especies evaluadas con el objeto de categorizar las de mejor aptitud para el sistema y contexto árido; y respecto a las repuestas térmicas que la tecnología brinda con el fin de obtener la máxima eficiencia energético-ambiental en todas las escalas -sistema en sí mismo, edilicia y trama urbana-.

B. COMPORTAMIENTO BIOLÓGICO DE CUBIERTAS VEGETADAS EN ZONAS ÁRIDAS

Se presentan las conclusiones finales y su discusión asociadas al desarrollo de conocimiento científico a nivel internacional en esta área temática. Las mismas resultan del análisis de variables ecofisiológicas relacionadas a la respuesta de las 14 especies seleccionadas en función de su potencial de adaptación al sistema de cultivo y las condiciones agro-ecológicas locales.

La cobertura vegetal en términos de variación porcentual depende de las condiciones intrínsecas de las plantas y de su adaptación al medio de crecimiento, independientemente de su origen -nativo o exótico- y su hábito de crecimiento -rastrero, arbustivo-. Esta conclusión se verifica a partir de los valores de coberturas semejantes -85%- que alcanzaron *Aptenia cordifolia* -especie exótica, rastrera- y *Hyalis argentea* -especie nativa y arbustiva-. Esto indica que no es posible generalizar patrones de crecimiento y que los mismos deben determinarse individualmente para cada especie a partir de ensayos experimentales que representen las condiciones limitantes del medio de cultivo.

De las especies ensayadas, los mayores porcentajes de cobertura se registraron en *Aptenia cordifolia* (88 %), *Cynodon dactylon* (89 %), *Hyalis argentea* (86 %) *Nassella tenuissima* (72 %) y *Sedum spectabile* (70 %). Respecto al género *Sedum* que es utilizado internacionalmente, en la región se evaluó la especie *Sedum spectabile* que mostró el comportamiento más débil entre el conjunto de especies con mayor poder tapizante. En este eje no se han identificado trabajos específicos que se puedan comparar, sin embargo, estos resultados pueden asociarse con los obtenidos por Yaghoobian & Srebric (2015) para ciudades de Estados Unidos, quienes estudiaron el impacto de distintos porcentajes de coberturas vegetales, con una mezcla de especies del género *Sedum*, en el desempeño térmico de esta tecnología tanto para climas húmedos como secos. Demostraron que para una cubierta vegetada la eficiencia térmica de la misma es dependiente de la cobertura vegetal; y los beneficios térmicos son mayores a medida que la cobertura aumenta.

Respecto a la adaptación de las plantas a la aridez y a la escasez del recurso hídrico, *Hyalis argentea* -de origen nativo- mostró ser la especie con mayor capacidad para regular la pérdida de agua por transpiración debido a la capacidad de administrar su apertura estomática para realizar las funciones vitales de fotosíntesis y respiración. Este comportamiento, se debe probablemente a su plasticidad adaptativa a condiciones restrictivas de crecimiento, derivadas de la anatomía y morfología de la especie. El intercambio gaseoso, propiciado por la apertura estomática, genera, además, en contextos urbanos, un beneficio ambiental asociado al control de la contaminación atmosférica derivado de los procesos de fijación de CO₂ y la liberación de O₂ y agua.

En el caso de las especies exóticas -*Sedum lineare*, *Aptenia cordifolia* y *Gazania rigens*- se observó una buena adaptabilidad en el primer año del ensayo, sin embargo, esta tendencia de comportamiento no se mantuvo estable durante el resto del periodo evaluado.

Respecto a la adaptación de las plantas a la alta heliofanía imperante en las zonas áridas, las especies evaluadas mostraron distintos niveles de temperatura de hoja resultantes del efecto combinado del metabolismo interno de cada especie y la estrategia de la planta

para evitar la saturación lumínica. En relación a ello, las especies *Hyalis argentea* y *Nassella tenuissima* -nativas- mostraron la menor temperatura de hoja. Esto podría deberse a la estrategia de las plantas, de desarrollar hojas finas y orientadas con dirección paralela a la incidencia de los rayos solares para controlar el sobrecalentamiento. En contraposición, las plantas del tipo “carnosa”, “crasa” o “suculenta” -*Aptenia cordifolia*, *Lampranthus multiradiatus*, *Sedum lineare*, *Sedum acre* y *Sedum spectabile*-, muestran las mayores temperaturas de hoja, esto impactaría en una mayor demanda hídrica de las plantas debido a una alta pérdida de agua por transpiración. Aún en estas condiciones, estas especies controlan la desecación y su marchitamiento temporal, manteniendo su metabolismo CAM (metabolismo ácido de las crasuláceas) activo y adaptado al medio de cultivo. El metabolismo CAM les permite a las plantas crasas cerrar los estomas durante las horas de máxima insolación y abrirlos al amanecer, atardecer y anochecer, de modo de evitar la pérdida de agua. La diferencia entre el metabolismo CAM y el resto de las plantas es que separan la fotosíntesis en dos etapas, con la incorporación de CO₂ durante la noche, sin presencia de luz solar. Luego, durante el día estas plantas fotosintetizan sin necesidad de tener los estomas abiertos, siendo más eficientes a la hora de evitar la pérdida de agua. Estos resultados son comparables en términos de conductancia estomática y temperatura de hoja con los obtenidos por Patishtán Pérez (2010) para *Aloe vera*, en los cuales, muestra que la conductancia estomática se redujo en condiciones de sequía y la actividad metabólica de las plantas es mayor a temperaturas bajas.

En relación al recurso hídrico, debido al emplazamiento del área de estudio en zonas áridas es necesario el aporte adicional de agua por riego. Uno de los objetivos específicos de esta tesis, busca que la tecnología de cubierta responda a un uso racional y eficiente de este recurso limitado, mediante la selección de especies de demandas hídricas mínimas. La aplicación de un sistema de irrigación por goteo subsuperficial complementó el aporte de agua por precipitaciones y permitió el aporte localizado de una cuota mínima de agua, que en ocasiones resultó deficitaria, pero, no obstante, permitió el crecimiento y la adaptación de la mayoría de las especies seleccionadas.

Todas las especies vegetales evaluadas han necesitado un aporte adicional de agua para su establecimiento. El consumo hídrico osciló entre 217 y 229 l/año/m² en comparación al requerimiento de especies arbóreas del área de estudio que oscila entre 600 y 800 l/año (Martinez et al., 2014). *Aptenia cordifolia* resultó ser la de menor requerimiento seguida por *Sedum lineare*, *Cynodon dactylon* y *Zephyrantes candida* que se encuentran en el tercio de menor consumo. En el rango medio de consumo hídrico se encontraron *Nassella tenuissima*, *Gazania rigens* y *Hyalis argentea*. En la categoría de mayor consumo anual están *Lampranthus multiradiatus*, *Sedum spectabile*, *Aristida purpurea* y *Sedum acre*. Estos resultados demuestran que implantar una cubierta vegetada con especies ampliamente utilizadas en otros países -caso del género *Sedum*-, para el área de estudio no respondería adecuadamente a los condicionantes locales -contexto árido y recursos hídricos limitados-. Aunque las diferencias de consumo hídrico no muestran variaciones impactantes en términos numéricos, es necesario considerar que refieren a una superficie de un metro cuadrado y que la implementación masiva de cubiertas vegetadas a escala urbana, podría significar grandes superficies de techos vegetados y en consecuencia adquieren relevancia los consumos diferenciales.

Merece un comentario particular el análisis del potencial de aprovechamiento de las precipitaciones, que, si bien para el área de estudio son escasas, permite complementar al riego en la estación más demandante -verano-. Debido al alto número de eventos de lluvias estivales torrenciales de corta duración y altos volúmenes instantáneos, el análisis y la cuantificación de las mismas durante el período de ensayo permiten concluir que las cubiertas vegetadas con menor cobertura vegetal -*Gazania rigens* y *Aristida purpurea*- mostraron una mayor escorrentía y drenaje. En cambio, las demás especies evaluadas, con desarrollo de coberturas vegetales del orden del 50 al 89% lograron aprovechar más del 60% del agua de lluvia, siendo *Nassella tenuissima* -con una cobertura vegetal del 72%- la especie que aprovecha el 75% del volumen precipitado. Estos resultados, indicarían que las cubiertas vegetadas pueden retener parte de la lámina de agua precipitada, lo cual las posicionan como una alternativa dentro del manejo hídrico integrado en cuencas urbanas. Esta conclusión es coincidente con la obtenida de las mediciones realizadas por Rosatto et al. (2013) para la cuenca urbana de Buenos Aires, donde determinó que las cubiertas naturadas con *Sedum ssp.* demostraron una capacidad de retención del agua de lluvia del 73 al 100%.

A los fines de determinar el peso adicional que representan las cubiertas vegetadas en las estructuras edilicias, se observó que la variación de peso osciló entre 55 y 81 kg/m² para los distintos paquetes tecnológicos, es decir, el conjunto planta+sustrato+sistema de riego. El paquete tecnológico vegetado con *Sedum spectabile*, especie exótica de hojas carnosas y hábito arbustivo, fue el que registró un mayor peso final destacándose de las demás especies. Por otro lado, el paquete tecnológico vegetado con *Nassella tenuissima*, gramínea nativa y de hábito arbustivo también, presentó el menor peso final por metro cuadrado. Esto indicaría una ventaja de la especie nativa que además de presentar un requerimiento hídrico acotado, aporta menor peso a la edificación que se traduce en menor vulnerabilidad estructural. Estos resultados se encuentran dentro del rango de capacidad portante esperado, mencionado también por Rosatto et al. (2013).

Finalmente, el análisis integrado de las variables ecofisiológicas permite determinar que la especie exótica *Aptenia cordifolia* y las dos especies nativas *Hyalis argentea* y *Nassella tenuissima* han demostrado una adaptación significativa al sistema de cultivo en cubiertas vegetadas. Esto se debe a que presentaron coberturas vegetales superiores al 70%; respuesta positiva al riego en base a su administración de la apertura estomática y diferencias de temperatura de hoja; al adecuado aprovechamiento del agua de lluvia y al consumo hídrico mínimo o intermedio de estas especies; y, por último, al reducido peso que adicionan a la capacidad portante de las cubiertas. Adicionalmente, las tres especies mencionadas se encuentran ampliamente difundidas en el contexto urbano y periurbano del área de estudio; y presentan alta disponibilidad en el mercado local, objetivo específico propuesto inicialmente.

De acuerdo a lo descripto, se desprende la relevancia que adquiere una apropiada selección de especies para integrar el paquete tecnológico de las cubiertas vegetadas. Estas especies deben estar adaptadas a las características climáticas de la región como así también a las condiciones que exige el medio de cultivo. Dicha selección debiera ponderar, tanto el origen nativo como exótico de las especies. Los paquetes tecnológicos conformados por especies tales como *Aptenia cordifolia*, *Nassella tenuissima* y *Hyalis argentea*, muestran mayor adaptación a la región respecto a las especies recomendadas

por la literatura internacional y a ampliamente difundidas y empleadas. La incorporación de estas especies proveniente de otros contextos ambientales -sin ensayos experimentales previos-, no asegura la mayor eficiencia del sistema. Esta visión es compartida por Baptiste et al. (2010), quien hace referencia a la importancia del empleo de plantas nativas en cubiertas naturadas.

Estas conclusiones representan un aporte significativo al estado del conocimiento relacionado a la respuesta biológica en torno al crecimiento y la adaptación de especies destinadas a cubiertas vegetadas en ciudades de zonas áridas, dado que la literatura internacional presenta estudios acotados en referencia a esta área temática específica.

C. COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE CUBIERTAS VEGETADAS EN ZONAS ÁRIDAS

En este apartado se sintetizan las conclusiones resultantes de la respuesta térmica de las cubiertas vegetadas, obtenidas tanto a partir de mediciones realizadas en ensayos experimentales con prototipos a escala, como también a partir del desarrollo de simulaciones computacionales aplicando softwares específicos a escala edilicia y urbana.

Los ensayos experimentales desarrollados en prototipos a escala, mostraron que la incorporación de cubiertas vegetadas permite disminuir la temperatura media interior entre 2 y 3 °C y la amplitud térmica entre 7 y 9 °C, durante la estación cálida para zonas áridas. En consecuencia, se alcanza el objetivo propuesto respecto de lograr diseños de cubiertas vegetadas que sean eficientes en la mejora de las condiciones de habitabilidad térmica de los espacios interiores, bajo las condiciones climáticas imperantes. Las disminuciones de la temperatura media interior son comparables con el rango de 1 a 3 °C obtenido para distintas ciudades y zonas climáticas por Savio et al. (2006), Figueroa (2009), Smith & Roehbecker (2011) y Qiu et al. (2013). En etapas futuras, la extrapolación de los modelos ajustados se aplicará a viviendas o construcciones mayores para verificar el rango de valores encontrados.

La magnitud del impacto de la cubierta vegetada sobre la temperatura del espacio interior, depende del hábito de crecimiento de la especie que integra el paquete biológico. Aquellas de tipo arbustivo -*Nassella tenuissima*, *Sedum spectabile*, *Hyalis argentea*- mostraron mejor comportamiento térmico que las especies de hábito rastrero -*Aptenia cordifolia*, *Sedum lineare*, *Cynodon dactylon*- generando un efecto positivo en términos de disminución de temperaturas a lo largo de todo el día. Este comportamiento podría explicarse por la morfología de la planta, que, al ser arbustiva, disminuye la transferencia de calor debido al sombreado del sustrato y, además posibilita la circulación de aire entre el follaje y el sustrato. Esta condición favorece la capacidad aislante de la cubierta durante el día y permite mejores condiciones de enfriamiento durante la noche.

El análisis estadístico demuestra que las temperaturas superficiales de la losa y la temperatura del sustrato correlacionan fuertemente con la temperatura del espacio interior. Esto manifiesta la necesidad de explorar las potencialidades de combinar diferentes tecnologías de cubiertas y paquetes biológicos -planta+sustrato- en coincidencia con lo postulado por Sanyé-Mengual et al. (2015). Respecto a la temperatura del sustrato, las especies evaluadas muestran un rango de variación de la temperatura media entre 22,9 °C y 31,4°C. Dichos valores se encuentran dentro del rango de las

temperaturas de sustrato (22,2°C y 34,2°C) reportadas en los estudios desarrollados por Blanusa et al. (2013) y Eksi et al. (2017).

En relación a los beneficios de la cubierta vegetada sobre el espacio exterior, el empleo de especies exóticas de hábito rastrero -*Aptenia cordifolia*, *Cynodon dactylon*, *Sedum acre* y *Sedum lineare*- mostraron mayores valores medios de temperaturas de hoja (en un rango de 37,0 a 37,7 °C) que las arbustivas nativas *Hyalis argentea* y *Nassella tenuissima* (34,1 °C y 35,3 °C) en coincidencia con lo referido por Theodosiou (2003), Niachou et al. (2001), Simmons et al. (2008) y Parizotto & Lambert (2011) que muestran que las temperaturas superficiales de los techos verdes oscilan entre 26 °C y 40 °C, dependiendo de las especies, el aislamiento del edificio y el clima. Las menores temperaturas medias de hoja registradas por *Hyalis argentea* y *Nassella tenuissima* se explicaría por el metabolismo que diferencia a plantas nativas, adaptadas a la mayor radiación solar y restricción del recurso hídrico, respecto a especies exóticas introducidas.

Cabe destacar que diversas especies bajo condiciones de estrés por sequía, aumentan gradualmente la temperatura de la hoja, acercando sus valores a la temperatura ambiente. Esta respuesta se debe probablemente a la disminución de la refrigeración por transpiración (Canavar, 2013). Blanusa et al. (2013) al comparar especies con distinto hábito de crecimiento en el Reino Unido -clima oceánico, subtipo templado-, determinaron que, en condiciones de restricción hídrica, las temperaturas superficiales de hoja en el caso del *Sedum* sp.- especie rastrera- alcanzan valores de 35 °C, mientras que *Stachys* sp.- especie arbustiva- muestra valores de 28,3 °C. Los valores reportados en esta tesis son altos respecto a los proporcionados por la literatura referidos a temperaturas de hoja (Fernandez et al, 2016; Canavar, 2013; Voyde et al, 2010). Pero, se logra una disminución significativa de la temperatura en comparación con cubiertas tradicionales con membrana hidrófuga, cuya temperatura superficial oscila entre 44 y 83 °C según color y acabado (Araújo & Lourenço, 2005; Parker et. al 2002; Al-Obaidi et. al 2014; Alchapar & Correa, 2016). Estos resultados permiten concluir que la cubierta vegetada desarrolla menores temperaturas superficiales -de hoja- respecto a una cubierta tradicional, con el beneficio adicional de una menor transferencia de calor hacia el interior de la edificación, que redundará en un menor consumo energético para refrigeración.

En este sentido Eksi et al. (2017) comparan cubiertas vegetadas con especies rastreras y arbustivas asociadas a distintos espesores de sustrato, determinando mejores comportamientos en el caso de cubiertas con mayor espesor de sustrato y especies de tipo arbustivo. Sin embargo, la investigación realizada no permite determinar cuál de las dos variables es la de mayor impacto térmico. Lundholm et al. (2014) estudian el desempeño térmico de cubiertas vegetadas en invierno, comparando 14 especies agrupadas de acuerdo a su hábito de crecimiento. Demuestra que las de tipo arbustivo mejoran las posibilidades de ahorro de energía en espacios interiores. Por lo que la integración de ambos resultados permitiría inferir los beneficios del uso de especies arbustivas a lo largo de todo el año. Por su parte, Blanusa et al. (2013) demuestran que la especie de hábito arbustivo *Stachys* sp. muestra un mejor comportamiento respecto a desarrollar menor temperatura de hoja (5°C) y menor temperatura de sustrato (12°C) lo que permite mejorar las condiciones de refrescamiento en climas cálidos y secos.

Esta tesis demuestra también que las especies de hábito de crecimiento arbustivo, *Nassella tenuissima*, *Sedum spectabile*, *Hyalis argentea*, aplicadas a cubiertas vegetadas de zonas áridas, resultaron más eficientes térmicamente con respecto a las especies de hábito rastrero, a igual espesor de sustrato. Respecto al género *Sedum* de origen foráneo y recomendado por la literatura internacional, para la región árida del centro oeste de Argentina, muestra respuestas diferentes de acuerdo a la arquitectura o morfología de las especies evaluadas. *Sedum spectabile*, de hábito de crecimiento arbustivo, muestra mayor capacidad para amortiguar las temperaturas exteriores respecto a *Sedum lineare*, cuyo hábito de crecimiento es rastrero. Sin embargo, la magnitud del impacto sobre el comportamiento térmico del espacio interior es menor que el de *Nassella tenuissima*, especie también arbustiva, pero de origen nativo.

Finalmente, la investigación desarrollada en este trabajo, asociada a evaluar el comportamiento térmico de cubiertas vegetadas en zonas áridas, muestra que *Nassella tenuissima*- especie arbustiva- ha presentado en términos medios, la menor temperatura de hoja (35,3 °C) junto a *Hyalis argentea* (34,1 °C), mayor diferencia de temperatura de sustrato respecto a la temperatura del aire (3,3 °C), menor temperatura superficial de la losa y mayor diferencia de temperatura interior respecto al caso con cubierta tradicional (3,4 °C). Además de ser la especie más conservativa del contenido de agua del sustrato; ha demostrado junto a *Hyalis argentea* ser las especies ensayadas en las cuales la temperatura de sustrato se ve menos influenciada por la temperatura exterior. Esto manifiesta el grado de influencia que la selección de la especie tiene sobre los beneficios térmicos de la cubierta vegetada. Por otra parte, es una especie de origen nativo, de bajo requerimiento hídrico y hábito arbustivo, sumado a su alto poder tapizante. Estas características permiten disminuir la ganancia solar directa a nivel de sustrato y facilitar los intercambios convectivos.

Los resultados de la respuesta térmica obtenidos a partir de ensayos experimentales, se han empleado como materia prima para el desarrollo de simulaciones ajustadas, que compara cubiertas vegetadas con distintas especies frente a un caso base.

La comparación de tecnologías de cubierta, por un lado, del tipo tradicional que emplea como material aislante el poliestireno expandido de baja densidad, y por otro, la incorporación de una cubierta vegetada a una losa de hormigón armado sin aislar, permite concluir que se genera una reducción significativa en el consumo de energía. Esta reducción comienza aproximadamente 3 horas después del amanecer y continúa hasta el comienzo de la etapa de enfriamiento, facilitando la disminución del consumo energético. Cabe destacar que, las simulaciones de casos con cubierta vegetada alcanzan con dos horas de anticipo, el consumo energético “cero” respecto al caso con cubierta tradicional sin aislar.

Se observó que la temperatura interior del caso con cubierta tradicional aislada mejora la situación de base -cubierta sin aislar-, y esta mejora aumenta levemente con el empleo de una cubierta vegetada con *Aptenia cordifolia*. Este último fenómeno, es más notorio en la segunda parte del día, es decir, cuando las temperaturas empiezan a disminuir luego del horario de la máxima. En cambio, al comparar una cubierta vegetada con *Hyalis argentea* respecto a un caso base, la reducción de temperatura es menos efectiva en la

etapa de calentamiento, que la encontrada para *Aptenia cordifolia*, aunque esto se verifica en la etapa de enfriamiento.

Por tanto, solo aislar una cubierta tradicional con poliestireno expandido de baja densidad de 50 mm de espesor, permite un ahorro energético del orden del 50 % respecto al caso base sin aislación. Para el caso de la cubierta vegetada con *Aptenia cordifolia* se logra un ahorro energético del 50 % respecto al consumo del caso base con cubierta tradicional sin aislar, y de un 11 % al compararla con el caso base con cubierta aislada. Por lo cual, la incorporación de una cubierta vegetada con *Aptenia cordifolia* reduce los consumos de energía respecto de una cubierta tradicional, incluso si se la compara con una cubierta tradicional aislada.

En cambio, las comparaciones con la cubierta vegetada con *Hyalis argentea*, muestran un ahorro energético menor, del orden del 41 % respecto al consumo del caso con cubierta tradicional sin aislar, y un consumo superior en un 6% al compararla con el caso aislado. En general, se puede concluir que el comportamiento verificado para cubiertas vegetadas equivale al menos al de incorporar una aislación térmica de 50 mm sobre una cubierta tradicional.

Esto indicaría que la incorporación de una cubierta vegetada con *Hyalis argentea* reduce los consumos de energía comparada con una cubierta tradicional sin aislar; pero no es más eficiente en términos de ahorro energético respecto a la incorporación de una capa aislante de poliestireno expandido de baja densidad sobre la cubierta de losa tradicional.

Estos datos se contraponen a los de la cubierta vegetada con *Aptenia cordifolia*, debido probablemente a la incidencia de las temperaturas exteriores o a las características intrínsecas de las especies y del medio de cultivo (sustrato).

Se observa, por tanto, que la selección de las especies vegetales a incorporar en las cubiertas vegetadas es un criterio de rigor que también puede definir el consumo energético interior de los edificios, por lo cual, es una premisa significativa de considerar en la etapa de diseño.

En relación a la evaluación de escenarios a escala urbana mediante un enfoque de modelado integrado, se presentan las conclusiones referidas al estudio de la reducción de la temperatura mediante cubiertas vegetadas y reflectivas en un contexto árido, mediante ENVI-met.

A escala urbana, para baja densidad constructiva, la incorporación de cubiertas vegetadas sobre losa de hormigón armado, mejoran las condiciones de habitabilidad térmica en los canales viales. Para la trama urbana en su conjunto, la incorporación de membranas de aluminio en las cubiertas, las mejoras en la habitabilidad térmica son aún mayores respecto a las cubiertas vegetadas. Este fenómeno se destaca en el periodo de mayor temperatura -12 a 20 hs-. En cambio, de 20 a 12 hs. todas las tecnologías de cubierta se comportan de forma similar. Se evidencia que, para baja densidad constructiva, no hay diferencias entre los tipos de cubierta vegetada analizados -*Aptenia cordifolia* o *Hyalis argentea*- ni entre los tipos de cubierta tradicional -sin aislar o aislada- en la determinación de la temperatura de los canales viales.

Respecto de las temperaturas de los escenarios para la media densidad constructiva, el fenómeno es similar al descrito para baja densidad, pero las temperaturas de los escenarios con cubiertas vegetadas o con cubiertas tradicionales se encuentran un grado por debajo respecto de los casos en baja densidad. Este efecto es más visible en las horas de mayor temperatura y puede deberse a que, al aumentar la densidad, existe mayor sombreadamiento y menor ganancia solar.

En alta densidad constructiva, la tendencia de comportamiento de disminución térmica, sigue el mismo patrón que en baja y media densidad, pero es de mayor magnitud respecto a la media densidad y respecto a la comparación entre media y baja densidad.

Es decir, al aumentar la densificación urbana, las diferencias en temperatura en los canales viales disminuyen con la aplicación de todas las tecnologías de cubiertas simuladas.

Las mayores diferencias se encuentran durante las horas de máximas temperaturas. La alta densidad constructiva maximiza los beneficios de las cubiertas vegetadas al compararla con la media y baja densidad. En estos escenarios, al comparar entre pares - cubiertas tradicionales y cubiertas vegetadas- se puede observar que no sólo han aumentado las magnitudes de todos los ΔT , sino que las diferencias entre cubiertas tradicionales y cubiertas vegetadas disminuyen, aproximándose los beneficios térmicos de ambas tecnologías.

Se puede afirmar que, desde un punto de vista de desempeño térmico urbano, la aplicación de cubiertas vegetadas es más competitiva en comparación con cubiertas tradicionales con membrana de aluminio (con alto albedo) en alta densidad respecto a la media y baja densidad constructiva. A nivel edilicio, la cubierta vegetada impacta principalmente en el último piso del edificio (o bien los dos últimos niveles). Por lo tanto, el impacto sobre el consumo energético debiera ser mayor en construcciones de uno o dos niveles. En este sentido, la cubierta vegetada, puede ser más eficiente a nivel urbano en escenarios de mayor densificación, aunque a nivel edilicio, el impacto sobre el consumo puede ser mayor en el caso de la baja densidad constructiva. Estos resultados son comparables con los obtenidos por Morakinyo et al. (2017), que evaluaron los beneficios térmicos urbanos obtenidos por la aplicación de cubiertas vegetadas en diferentes densidades edilicias y en distintas ciudades del mundo.

El uso de ENVI-met para predecir temperaturas a escala urbana no presenta diferencias entre las dos cubiertas vegetadas ni entre las dos cubiertas tradicionales. Lo cual demuestra que, a pesar de la escala de medición, el software presenta una limitación en cuanto a la sensibilidad de las modificaciones realizadas en la configuración de los escenarios. Es decir, distintos tipos de cubierta vegetada o la colocación o no de un aislante en una cubierta tradicional, generan consumos energéticos diferenciales a escala edilicia como se ha descrito en los resultados de las simulaciones con el software EnergyPlus.

Estos consumos energéticos diferenciales a escala edilicia deberían repercutir a escala urbana, ya que no sólo generan calentamiento en los edificios -aún más en los de tipo constructivo másico- debido a mayores o menores ganancias internas, sino también que en casos de mayor requerimiento de energía auxiliar para enfriamiento, se necesita mayor

funcionamiento de equipos de acondicionamiento de aire para lograr temperaturas de confort, con el consecuente aporte calórico de estos equipos al medio exterior.

Esta tesis demuestra que las tecnologías tradicionales de cubierta podrían mejorarse con la incorporación de membranas reflectivas -de aluminio- o con cubiertas vegetadas. Ambas tecnologías probadas en esta investigación demostraron efectos beneficiosos en términos de temperatura del aire urbano. Sin embargo, la incorporación de cubiertas vegetadas brinda beneficios ambientales adicionales relacionados a los servicios ecosistémicos y a un eficiente comportamiento térmico a escala edilicia.

Como conclusión final, se logra comprobar la hipótesis planteada respecto a que el diseño y la incorporación de cubiertas vegetadas apropiadas a ciudades de zonas áridas constituye una de las estrategias viables para el desarrollo urbano-edilicio sustentable, de modo de fortalecer las condiciones ambientales del oasis con los beneficios que aporta el enverdecimiento urbano, a la vez que se logra disminuir los consumos energéticos a escala edilicia.

La adecuada combinación de variables como la selección de especies vegetales asociada a una respuesta biológica que refleje las mejores aptitudes para el sistema y les proporcione potencialidad respecto a maximizar el desempeño termo-energético tanto a escala edilicia como urbana, permitirá consolidar la incorporación de las cubiertas vegetadas en relación con los recursos climáticos locales, en particular los concernientes a zonas áridas.

La implementación de diversas tecnologías de cubierta -con y sin aislación o vegetadas- permitiría obtener diferentes eficiencias energéticas a nivel edilicio y a escala urbana. El ajuste de las herramientas de predicción mediante la simulación que vincula modelos a diferentes escalas, como EnergyPlus y ENVI-met, facilitará tanto el diseño de edificios sostenibles como la planificación urbana.

Los resultados obtenidos permiten postular recomendaciones posibles de ser transferidas a entes provinciales y municipales involucrados en el diseño urbano en cuanto a la apropiada selección de especies con aptitud para integrar cubiertas vegetadas en ciudades de zonas áridas, en el marco de la sustentabilidad urbana y ambiental.

BILIOGRAFÍA

- Akbari H, Levinson R, Stern S. (2008). Procedure for measuring the solar reflectance of flat or curved roofing assemblies. *Solar Energy*. 2008; 82 (7): 648-655.
- Akbari M., Toomanian N., Droogers P., Bastiaanssen W., Gieske A. (2007). Monitoring irrigation performance in Esfahan, Iran, using NOAA satellite imagery. *Agricultural Water Management*. Volume 88, Issues 1–3, 2007, pages 99-109, ISSN 0378-3774
- Akbari, H., Cartalis, C., Kolokotsa, D., Muscio, A., Pisello, A. L., Rossi, F., et al. (2016). Local climate change and urban heat island mitigation techniques—the state of the art. *Journal of Civil Engineering and Management*, 22(1), 1–16.
- Alchapar N. L., Correa E. N. (2016). Aging of roof coatings. Solar reflectance stability according to their morphological characteristics, *Construction and Building Materials*, Volume 102, Part 1, 2016, Pages 297-305, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.005>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181530636X>)
- Alchapar, N. (2014). *Materiales de la envolvente urbana. Valoración de su aptitud para mitigar la isla de calor en ciudades de zonas áridas*. Salta, Argentina: Universidad Nacional de Salta.
- Alchapar, N. L., Correa, E. N., and Cantón, M. A. (2014). Classification of building materials used in the urban envelopes according to their capacity for mitigation of the urban heat island in semiarid zones. *Energy and Buildings*, 69,22–32.
- Alexandri, E., Jones P. (2008). Temperature decreases in an urban walls canyon due to green and green roofs in diverse climates. *Buildings and Environment* 43, 480–493.
- Ali-Toudert, F. (2005). Dependence of outdoor thermal comfort on street design in hot and dry climate. *Berichte des Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg*.
- Ambrosetti, J. A. (1971). Especies interesantes en la ordenación de la Cuenca Papagayos. In: *IADIZA, Deserta II, Anales del Instituto Argentino de Investigaciones de las Zonas Áridas*. Ed. Zeta, Mendoza. 207-237p.
- Antúnez A. (2010). *Región de O'higgins: Eficiencia en sistemas de riego por goteo en el secano*. INIA Tierra Adentro.
- Araújo Prado R. T., Lourenço Ferreira F. (2005). Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials. *Energy and Buildings*. Vol. 37, Issue 4, 2005. Pages 295-300. ISSN 0378-7788. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.03.009>.<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778804001793>)
- Arkar C., Domjan S., Majkovič D., Šumi J., Medved S.(2015). Lightweight green roofs' thermal response under freezing conditions. *Energy Procedia* 78 (2015) 1189 – 1194.
- Arregui Henk, L. J. (2016). *El futuro de los techos verdes en la ciudad de Buenos Aires [en línea]*. Trabajo Final de Ingeniería en Producción Agropecuaria. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Católica Argentina. Disponible en: <http://bibliotecadigital.uca.edu.ar/repositorio/tesis/futuro-techos-verdes-buenos-aires.pdf> [Fecha de consulta:1 de Octubre de 2018]
- ASHRAE Standard 55 - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, 2013.

-
- ASTM E1918-97/06 Standard. (2006). Test Method for Measuring Solar Reflectance of Horizontal and Low- Sloped Surfaces in the Field.
- ATLAS de Zonas Áridas de América Latina y el Caribe. (2010). Programa Hidrológico internacional de la UNESCO para América Latina y el Caribe. PHI-VII. Documento técnico N° 25. Elaborado por: Koen Verbist, Fernando Santibañez, Donald Gabriels y Guido Soto.
- Azeñas V., Janner I., Medrano H., Gulías J. (2018). Performance evaluation of five Mediterranean species to optimize ecosystem services of green roofs under water-limited conditions. *Journal of Environmental Management* 212 (2018) 236e247
- Baik JJ, Kwak KH, Park SB, Ryu YH. (2012). Effects of building roof greening on air quality in street canyons. *Atmos Environ* 2012;61(Supplement C):48–55.
- Balaras C, Argiriou A. (2002). Infrared thermography for building diagnostic. *Energy and Buildings*. 2002;34: 171-183.
- Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Casanoves F., Di Rienzo J.A., Robledo C.W. (2008). *Infostat. Manual del Usuario*, Editorial Brujas, Córdoba, Argentina
- Baptiste M.P.; Castaño, N.; Cárdenas, D.; Gutiérrez-Bonilla, F.P.; Gil, D.L. y Lasso-Alcalá, C.A. (eds.). (2010). Análisis de riesgo y propuesta de categorización de especies introducidas para Colombia. Bogotá, D.C.: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. 200 p.
- Barreira E, De Freitas V. (2007). Evaluation of building materials using infrared thermography. *Construction and Building Materials*. 2007; 21(1): 218-224.
- Bean, R., Pitt, R. (2012). Advancing stormwater beneficial uses: ET mapping in urban areas. *World Environmental and Water Resources Congress*, 2012, 2094–2105.
- Benson, F. B., Henderson, J. J., & Caldwell, D. E. (1972). *Indoor-Outdoor Air Pollution Relationship: A Literature Review*. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC. Office of Air Programs.
- Bermejo, R. (2014). *Del desarrollo sostenible según Brundtland a la sostenibilidad como biomimesis*. Bilbao: Universidad del País Vasco.
- Berndtsson J. C. (2010) Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: a review. *Ecol Eng* 36(4):351–360. doi:10.1016/j.ecoleng.2009.12.014
- Berndtsson J. C. (2010) Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: a review. *Ecol Eng* 36(4):351–360. doi:10.1016/j.ecoleng.2009.12.014
- Besir A.B., Cuce, E. (2018). Green roofs and facades: A comprehensive review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 82, Part 1, 2018, pages 915-939, ISSN 1364-0321.
- Bevilacqua P., Mazzeo D., Bruno R., Arcuri N. (2016). Experimental investigation of the thermal performances of an extensive green roof in the Mediterranean area, *Energy and Buildings*. Volume 122, 2016, pages 63-79, ISSN 0378-7788.
- Blank L, Vasl A, Levy S, Grant G, Kadas G, Dafni A. (2013). Directions in green roof research: a bibliometric study. *Build Environ* 2013;66:23–8.

- Blanusa, T., Vaz Monteiro, M. M., Fantozzi, F., Vysini, E., Li Y. and Cameron R. W. F. (2013) Alternatives to Sedum on green roofs: Can broad leaf perennial plants offer better 'cooling service'? *Building and Environment* 59 (2013) 99-106 ([<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.08.011> | <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.08.011>]).
- Blanusa, T., Vaz Monteiro, M. M., Fantozzi, F., Vysini, E., Li, Y. and Cameron, R. W. F. (2012) Alternatives to Sedum on green roofs: Can broad leaf perennial plants offer better 'cooling service'? *Building and Environment*, 59. pp. 99-106. ISSN 0360-1323
- Blocken, B. (2015). Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. *Building and Environment*, 91, 219–245.
- Blumthaler M., Ambach. (1990). Indication of increasing solar ultraviolet-B radiation flux in alpine regions *SCIENCE* 13 APR 1990, Vol. 248 : 206-208
- Boivin, M., Lamy, M., Gosselin, A., and Dansereau, B. (2001) Effect of artificial substrate depth on freezing injury of six herbaceous perennials grown in a green roof system. *HortTech* 11(3): 409-412
- Bollinger, Erben, Grau y Heubl. (2005). *ARBUSTOS*. Editorial: Blume, Barcelona. ISBN 10: 8470316176 / ISBN 13: 9788470316173
- Borland, A.M., Dodd, A.N., (2002). Carbohydrate partitioning in crassulacean acid metabolism plants: reconciling potential conflicts of interest. *Funct. Plant Biol.* 29, 707–716.
- Bórmida, E. (1984). Mendoza, modelo de ciudad oasis. *Revista SUMMA*, 1984, n° 226, pp. 68-72.
- Bórmida, E. y Dabul, N. (1997). Mendoza y el Urbanismo de Oasis. Congreso Internacional de Americanistas (Ica 49), Simposio Historia - Historia Urbana De Las Américas (Hist. 16), 7-11 julio 1997. Quito, Ecuador. En: <http://www.equiponaya.com.ar/congresos/contenido/49CAI/Bormida.htm>
- Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., & Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 147–155.
- Brenneisen S. (2006). Space for urban wildlife: Designing green roofs as habitats in Switzerland. *Urban Habitats*. 4: 27–36. www.urbanhabitats.org/v04n01/index.html).
- Bruse, M. (1999). The influences of local environmental design on microclimate. University of Bochum.
- Bruse, M., & Fler, H. (1998). Simulating surface–plant–air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling & Software*, 13(3), 373–384.
- Burt C. M., Clemmens, A. J.; Strelkoff, T. S.; Solomon, K. H.; Bliesner, R. D.; Hardy, L. A.; Howell, T. A.; Eisenhauer, D. E. (1997). Irrigation performance measures efficiency and uniformity. *J. Irrig. Drain Eng. ASCE* 123(6): 423-442.
- Butler C., Butler E., Orians C. M. (2012) Native plant enthusiasm reaches new heights: Perceptions, evidence, and the future of green roofs. *Urban Forestry & Urban Greening* 2012:11 1–10.

-
- Butler C., Orians C. M. (2011). Sedum cools soil and can improve neighboring plant performance during water deficit on a green roof. *Ecological Engineering*. Volume 37, Issue 11, 2011, pages 1796-1803, ISSN 0925-8574.
- Cameron, R. W. F., Taylor, J. E. T., Emmett, M. R. (2014) What's 'cool' in the world of green façades? How plant choice influences the cooling properties of green walls. *Building and Environment*, 2014, n° 73, pp. 198-207.
- Cameron, R.W.F., Harrison-Murray, R.S., Atkinson, C.J., Judd H.L. (2006). Regulated deficit irrigation: a means to control growth in woody ornamentals. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 81, 435-443.
- Canavar, Ö. (2013). Comparison and determination of the leaf temperature of sunflower and safflower under drought stress. *HELIA*, 36, Nr. 59, p.p. 47-58 (2013). DOI: 10.2298/HEL1359047C
- Carrasco-Ríos, Libertad. (2009). Efecto de la radiación ultravioleta-b en plantas. *Idesia (Arica)*, 27(3), 59-76.
- Carrieri, S. A.; Codina, R. A.; Manzano, E. (1996). Arbolado de rutas en zonas áridas. Propuesta para la Provincia de Mendoza. Verde complementario para vías de circulación de la provincia de Mendoza. Cátedra de Parques y Jardines. Ed. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza. 105 p.
- Carter T., Keeler A. (2008). Life-cycle cost–benefit analysis of extensive vegetated roof systems. *Journal of Environmental Management*. Volume 87, Issue 3, 2008, pages 350-363, ISSN 0301-4797.
- Castleton H.F., Stovin V., Beck S.B.M., Davison J.B. (2010) Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. *Energy and Buildings*. Volume 42, Issue 10, 2010, pages 1582-1591, ISSN 0378-7788.
- Chang NB, Rivera B. J., Wanielista M. P. (2011). Optimal design for water conservation and energy savings using green roofs in a green building under mixed uncertainties. *Journal of Cleaner Production*. Volume 19, Issue 11, 2011, Pages 1180-1188, ISSN 0959-6526
- Chen PY, Li YH, Lo WH, Tung Cp (2015). Toward the practicability of a heat transfer model for green roofs. *Ecol Eng* 2015;74(Supplement C):266–73.
- Chowa, W., & Brazel, A. (2012). Assessing xeriscaping as a sustainable heat island mitigation approach for a desert city. *Building and environment*, 170-181.
- Clarck, J.R.; Matheny, N.P. (1998). A model of Urban Forest Sustainability: Application to Cities in the United States. *Journal of Arboriculture*. 1998. March, vol. 24, n° 2, pp. 112 a 120.
- Codina R. A., Manzano E. R., Carrieri S. A., Fioretti S. B. (2003). Paisajismo sustentable en zonas áridas. Especies útiles para parquizaciones xéricas. *Rev. FCA UNCuyo*. Tomo XXXV. N° 2. Año 2003. 33-44.
- Coma J., Pérez G., Solé C., Castell A., Cabeza L. F. (2016). Thermal assessment of extensive green roofs as passive tool for energy savings in buildings. *Renewable Energy*. Volume 85, 2016, pages 1106-1115, ISSN 0960-1481.
- Cox P. M., Betts R. A., Betts A., Jones C. D., Spall S. A., Totterdell I. J. (2002) Modelling vegetation and the carbon cycle as interactive elements of the climate system, Editor(s):

-
- R.P. Pearce. *International Geophysics*. Academic Press. Volume 83, 2002, Pages 259-279, ISSN 0074-6142, ISBN 9780125480352.
- Cox, H. M. (2012). A sustainability initiative to quantify carbon sequestration by campus trees. *Journal of Geography*, 111, 173–183.
- Cuce E, Cuce PM, Riffat S. (2016). Novel glazing technologies to mitigate energy consumption in low-carbon buildings: a comparative experimental investigation. *Int J Energy Res* 2016;40:537–49.
- Cuce E, Cuce PM, Wood CJ, Riffat SB. (2014). Toward aerogel based thermal superinsulation in buildings: a comprehensive review. *Renew Sustain Energy Rev* 2014;34:273–99.
- Cuce E, Cuce PM. The impact of internal aerogel retrofitting on the thermal bridges of residential buildings: an experimental and statistical research. *Energy Build* 2016;116:449–54.
- Cuce E, Riffat SB. (2015). Vacuum tube window technology for highly insulating building fabric: an experimental and numerical investigation. *Vacuum* 2015;111:83–91.
- Cuce E. (2015). Toward thermal superinsulation technologies in buildings: latest developments in glazing and building fabric. Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing; 2015.
- Cuce E. (2017). Experimental and numerical investigation of a novel energy-efficient vacuum glazing technology for low-carbon buildings. *Indoor Built Environ* 2017;26:44–59.
- Dalmasso, A. (2010). *Silvicultura Urbana. II Árboles apropiados para la provincia de Mendoza*. Boletín de Extensión Científica. Instituto Argentina de Investigaciones de Zonas Áridas. Inca Editorial. 66 p.
- Dan L, Elie B-Z, Michael O. (2014). The effectiveness of cool and green roofs as urban heat island mitigation strategies. *Environ Res Lett* 2014;9(5):055002.
- de Munck, C. S., Lemonsu, A., Bouzouidja, R., Masson, V., and Claverie, (2013). R.: The GREENROOF module (v7.3) for modelling green roof hydrological and energetic performances within TEB, *Geosci. Model Dev.*, 6, 1941-1960, <https://doi.org/10.5194/gmd-6-1941-2013>, 2013.
- Del Barrio P. Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. (1998). *Energy Build* 1998;27:179–93.
- DeNardo J. C., Jarrett A. R., Manbeck H. B., Beattie D. J., Berghage R. D. (2003). Green roof mitigation of stormwater and energy usage. St. Joseph, MI: ASAE; 2003.
- Department of Energy (2009). Building Energy software Tools. Recuperado de http://www.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/>[Visitado el: 10 de Diciembre de 2018.]
- Di Benedetto A., Tognetti, J. (2016). Técnicas de análisis de crecimiento de plantas: su aplicación a cultivos intensivos. *REVISIONES. RIA / Vol. 42 / N°3 Pág. 258*
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. *InfoStat versión 2017*. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>

- Djedjig R, Ouldboukhite S., Belarbi R., Bozonnet E. (2012). Development and validation of a coupled heat and mass transfer model for green roofs. *Int Commun Heat Mass Transfer* 2012;39(6):752–61.
- DOE, EnergyPlus engineering reference – the reference to EnergyPlus calculations, 2007. <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/engineeringreference.pdf>.
- Dominguez-Hernandez J, Lozano-Martinez-Luengas A. (1998). Green roof systems. *Adv Ecol Sci* 1998;1:615–24.
- Duffie, J.A. Beckman, W.A. (1991). *Solar Engineering of Thermal Processes*, p. 54-59, New York: Wiley-Interscience.
- Dunnett N, Kingsbury N. *Planting green roofs and living walls*. 2nd ed. Portland (OR): Timber Press; 2008.
- Dunnett N, Nolan A. The effect of substrate depth and supplementary watering on the growth of nine herbaceous perennials in a semi-extensive green roof. *Acta Hort* 2004;643:305e9.
- Dunnett, N.; Kingsbury, N. (2004). *Planting Green Roofs and Living Walls*. Timber Press Inc, Portland, Oregon.
- Durhman, A.K., Rowe, D.B., Rugh, C.L., (2007). Effect of substrate depth on initial growth, coverage, and survival of 25 succulent green roof plant taxa. *Hort Science* 42, 588–595.
- Eguiarte L. E., J. Nuñez-Farfán, C. Domínguez y C. Cordero. (1999). Biología evolutiva de la Reproducción de las plantas. En Núñez-Farfán, J. y L. E. Eguiarte (Comp): *La Evolución Biológica*. Ciencias revista de difusión de la Facultad de Ciencias, Instituto de Ecología, UNAM y CONABIO. México, D.F.
- Eksi M., Rowe D. B., Wichmanc I. S.; Andresen J. A. (2017). Effect of substrate depth, vegetation type, and season on green roof thermal properties. *Energy and Buildings* 145 (2017) 174–187 ([<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.017> | <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.017>]).
- Escobedo F. J., Giannico V., Jim C.Y., Sanesi G., Laforteza R.. (2018). Urban forests, ecosystem services, green infrastructure and nature-based solutions: Nexus or evolving metaphors? *Urban Forestry & Urban Greening*. 2018, ISSN 1618-8667-1.
- Esteves, A. 2017. *Arquitectura Bioclimática Sustentable*. Mendoza
- Eumorfopoulou EA, Kontoleon KJ. (2009). Experimental approach to the contribution of plant-covered walls to the thermal behaviour of building envelopes. *Build Environ* 2009;44:1024–38.
- Fao. (2007). *Informes sobre recursos mundiales de suelos*. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación. Roma, 2007. <http://www.fao.org/3/a-Y5738s.pdf>
- FAO. (2018). Capítulo 5: medios y técnicas de producción. <http://www.fao.org/docrep/005/s8630s/s8630s07.htm> (Visitado el 1 de octubre de 2018).
- Farrell, C., Szota, C., Williams, N.S.G., Arndt, S.K., (2013). High water users can be drought tolerant: using physiological traits for green roof plant selection. *Plant Soil* 372, 177e193. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1725-x>.

- Feng, C., Yao, R., Zhang, Y. (2012). Analysis on the impact of roof greening's water consumption made by meteorological factor. International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring, 2012, 142–144.
- Fereres, E. and Soriano, M.A. (2007) Deficit Irrigation for Reducing Agricultural Water Use. Journal of Experimental Botany, 58, 147-159. <http://dx.doi.org/10.1093/jxb/erl165>
- Fernández Gálvez J. (2010). El recurso suelo-agua en medios áridos y semiáridos. <http://digital.csic.es/bitstream/10261/29768/18/fernandez.pdf>
- Fernández, M. E.; Passera, C. B.; Cony, M. A. (2016). Sapling growth, water status and survival of two native shrubs from the Monte Desert, Mendoza, Argentina, under different preconditioning treatments. Rev. FCA UNCUYO. 2016. 48(1): 33-47. ISSN impreso 0370-4661. ISSN (en línea) 1853-8665.
- Figuroa M. (2009). Green Roof Performance: Passive design implications in Los Angeles, California. PLEA2009 - 26th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Quebec City, Canada, 22-24 June 2009.
- Fioretti R., Palla A., Lanza L.G., Principi P. (2010). Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate. Building and Environment 45 (2010) 1890e1904.
- Flores Asin J. E., Martínez C. F., Cantón M. A. (2013). Tecnologías verdes. Potencial de aplicación en el área metropolitana de MENDOZA (AMM). En: Acta de la XXXVI Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 1, pp. 05.115-05.120, 2013. Impreso en la Argentina. ISBN 978-987-29873-0-5.
- Flores Larsen S, Hongn M. (2012). Termografía infrarroja en la edificación: Aplicaciones cualitativas. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. 2012;16: 08.25-08.32
- Flores, S., Lesino, G., Saravia, L., Y Alía De Saravia, D. (2005). SIMEDIF para Windows. Salta: INENCO - unas, 1984. Versión 2005.
- Fontela C., Salatino S., Morábito J., Mirábito C., Maffei J., Mastrantonio L. (2009). Riego por goteo en Mendoza, Argentina: evaluación de la uniformidad del riego y del incremento de salinidad, sodicidad e iones cloruro en el suelo. Rev. FCA UNCuyo. Tomo XLI. N° 1. Año 2009. 135-154
- Foustalieraki M, Assimakopoulos M.N., Santamouris M., Pangalou H. (2017). Energy performance of a medium scale green roof system installed on a commercial building using numerical and experimental data recorded during the cold period of the year. Energy Build 2017;135(Supplement C):33–8.
- Freitas S., Peixoto V., Ramos N., Künzel H. M., Zirkelbach D. (2016). Vegetative roof performance during summer—critical analysis of the irrigation effect. Thermal performance of the exterior envelopes of whole buildings XIII international conference. Clearwater Beach, FL: ASHRAE; 2016. p. 335–46.
- Gaffin (2005). Energy balance modelling applied to a comparison of white and green roof cooling efficiency, in: Greening Rooftops for Sustainable Communities, Washington, DC, 2005.

-
- Gago, E., Roldan, J., Pacheco-Torres, R., & Ordoñez, J. (2013). The city and urban heat islands: A review of strategies to mitigate adverse effects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 749–758.
- Getter KL, Rowe DB, Andresen JA, Wichman IS. (2011). Seasonal heat flux properties of an extensive green roof in a Midwestern U.S. climate. *Energy Build* 2011;43:3548–57.
- Getter KL, Rowe DB. (2006). The role of extensive green roofs in sustainable development. *HortScience* 2006;41:1275e85.
- Giridharan R., Lau S.S.Y., Ganesan S. (2005). Nocturnal heat island effect in urban residential developments of Hong Kong. *Energy Buildings* 2005;37:9, 64-71.
- González Loyarte, M. M., Menenti M., Diblasi Á. M. (2009). Mapa bioclimático para las Travesías de Mendoza (Argentina) basado en la fenología foliar. *Rev. FCA UNCuyo*. Tomo XLI. N° 1. Año 2009. 105-122.
- Graceson A, Hare M, Hall N, Monaghan J. Use of inorganic substrates and composted green waste in growing media for green roofs. *Biosyst Eng* 2014;124:1–7.
- Gratani, L., & Varone, L. (2006). Carbon sequestration by *Quercus ilex* L. and *Quercus pubescens* Willd. and their contribution to decreasing air temperature in Rome. *Urban Ecosystems*, 9, 27–37.
- Grimmond CSB, Oke TR. (2002). Turbulent heat fluxes in urban areas: observations and a local-scale urban meteorological parameterization scheme (LUMPS). *Journal of Applied Meteorology* 41: 792–810.
- Guevara Díaz, J. M. (2008). Cuantificación del perfil del viento hasta 100 m de altura desde la superficie y su incidencia en la climatología eólica. *Terra Nueva Etapa [en línea]* 2013, XXIX (Julio-Diciembre) : [Fecha de consulta: 10 de diciembre de 2018] Disponible en:<<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=72130181006>> ISSN 1012-7089
- Guo, Y., Liu, S., Baetz, B.W., 2012. Probabilistic rainfall–runoff transformation considering both infiltration and saturation excess runoff generation process. *Water Resour. Res.* 48.
- Gutierrez J.R., Squeo F.A. (2004). Importancia de los arbustos en los ecosistemas semiáridos de Chile. *Ecosistemas 2004: Huxman TE, KA Snyder, D Tissue, AJ Leffler, K Ogle, WT Pockman, DR Sandquist, DL Potts, S Schwinning. 2004. Precipitation pulses and carbon fluxes in semiarid and arid Ecosystems. Oecologia* 141: 254-268.
- Hashemi SSG, Mahmud HB, Ashraf MA. (2015). Performance of green roofs with respect to water quality and reduction of energy consumption in tropics: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;52(Supplement C):669–79.
- He J., Huang L.K., Chow W. S., Whitecross M.I., Anderson J. M. (1993) Effects of Supplementary Ultraviolet-B Radiation on Rice and Pea Plants. *Functional Plant Biology* 20, 129-142.
- He Y., Yu H., Dong N., Ye H. (2016). Thermal and energy performance assessment of extensive green roof in summer: A case study of a lightweight building in Shanghai. *Energy and Buildings*. Volume 127, 2016, pages 762-773, ISSN 0378-7788.

-
- Heisler GM. (1986). Effects of individual trees on the solar radiation climate of small buildings. *Urban Ecol* 1986;9(34):337e59. [http://dx.doi.org/10.1016/03044009\(86\)90008-2](http://dx.doi.org/10.1016/03044009(86)90008-2).
- Herrera J, Bonilla C. A., Castro L., Vera S., Reyes R., Gironás J. (2017). A model for simulating the performance and irrigation of green stormwater facilities at residential scales in semiarid and Mediterranean regions. *Environ Modell Software* 2017;95:246–57.
- Herrera J., Flamant G., Gironás J. Vera S., Bonilla C. A., Bustamante W., Suárez F. (2018). Using a hydrological model to simulate the performance and estimate the runoff coefficient of green roofs in semiarid climates. *Water* 2018;10(2):198.
- Hien, W.N., Yok, T.P., Yu, C., (2007). Study of thermal performance of extensive rooftop greenery systems in the tropical climate. *Building and Environment* 42, 25e54
- Hodo-Abalo S., Banna M., Zeghmati B. (2012). Performance analysis of a planted roof as a passive cooling technique in hot-humid tropics. *Renewable Energy*. Volume 39, Issue 1, 2012, pages 140-148, ISSN 0960-1481.
- Indec. (2010). Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. República Argentina. https://www.indec.gov.ar/nivel4_default.asp?id_tema_1=2&id_tema_2=41&id_tema_3=135
- Informe Gestión de la Urbanización en Ciudades Turísticas. (2006). Provincia y Comunidad Europea en el año 2006.
- International Energy Agency. (2013). Technology roadmap energy efficient building envelopes.
- Jabareen, Y. R. (2006). Sustainable Urban Forms: Their Typologies, Models, and Concepts. *Journal of Planning Education and Research*, 26(1), 38–52. <https://doi.org/10.1177/0739456X05285119>
- Jackson R.B., Sperry J. S., Dawson T.E.. (2000). Root water uptake and transport: using physiological processes in global predictions. *Trends in Plant Science* 5: 482-488
- Jaffal Issa, Ouldboukhite Salah-Eddine y Belarbi Rafik. (2012). A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. *Renewable Energy-Elsevier*, 2012, n° 43, pp. 157-164.
- Jim CY. (2014). Air-conditioning energy consumption due to green roofs with different building thermal insulation. *Appl Energy* 2014;128(Supplement C):49–59.
- Jim, C. Y., Peng, L. L. H. (2012a). Weather effect on thermal and energy performance of an extensive tropical green roof. *Urban Forestry & Urban Greening*, 11, 73–85.
- Jim, C. Y., Peng, L. L. H. (2012b). Substrate moisture effect on water balance and thermal regime of a tropical extensive green roof. *Ecological Engineering*, 47, 9–23.
- Jiménez Sierra C. L. (2010). La sexualidad en las plantas. *Revista Digital Universitaria*. 01 de agosto 2010 • Volumen 11 Número 8 • ISSN: 1067-6079.
- Jin, C., Bai, X., Luo, T., & Zou, M. (2017). Effects of green roofs' variations on the regional thermal environment using measurements and simulations in Chongqing, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 29, 223–237.

-
- Jones HG, Stoll M, Santos T, de Sousa C, Chaves MM, Grant OM. Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: application to grapevine. *J Exp Bot* 2002;53:2249e60.
- Kakani V.G., Reddy K.R., Zhao D., Sailaja K. (2003). Field crop responses to ultraviolet-B radiation: a review. *Agricultural and Forest Meteorology* 120 (2003) 191–218.
- Karteris M., Theodoridou I., Mallinis G., Tsiros E., Karteris A. (2016). Towards a green sustainable strategy for Mediterranean cities: Assessing the benefits of large-scale green roofs implementation in Thessaloniki, Northern Greece, using environmental modelling, GIS and very high spatial resolution remote sensing data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 58, 2016, pages 510-525, ISSN 1364-0321.
- Katzschner, L. (1997). Urban climate studies as tools for urban planning and architecture. *Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído* (págs. 49-58). Salvador: FAU-UFBA/ANTAC.
- Kolokotsa D., Santamouris M., Zerefos S.C. (2013). Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in European climates for office buildings under free floating conditions. *Solar Energy*. Volume 95, 2013, pages 118-130, ISSN 0038-092X.
- Kolokotsa, D. D., Giannariakis, G., Gobakis, K., Giannarakis, G., Synnefa, A., & Santamouris, M. (2017). Cool roofs and cool pavements application in Acharnes, Greece. *Sustainable Cities and Society*.
- Kolokotsa, D., Gobakis, K., Papantoniou, S., Georgatou, C., Kampelis, N., Kalaitzakis, K., et al. (2016). Development of a web based energy management system for University Campuses: The CAMP-IT platform. *Energy and Buildings*, 123, 119–135.
- La Roche P., Berardi U. (2014). Comfort and energy savings with active green roofs, *Energy and Buildings*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.055>
- La Roche, P. (2009). Low Cost Green Roofs for Cooling: Experimental series in a hot and dry climate. *PLEA - 26th Conference on Passive and Low Energy Architecture*, Quebec City, Canada, 22-24 June 2009.
- Lamnatou C, Chemisana D. (2015). A critical analysis of factors affecting photovoltaic green roof performance. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;43(Supplement C):264–80.
- Lapujade P. (1994). On site roof reflectance measurement methodology: Theory and limitations. *FSEC-RR- 28-94*.
- Lara. B., Rojo J., Blanco J. J., C. Cardador, Serrano J. I., Soriano D., Pérez-Badía R. (2017). Flora ornamental y potencial alergénico de los espacios verdes urbanos. Comparativa en parques de la ciudad de Toledo. *Revista de Salud Ambiental*, [S.l.], v. 17, n. 2, p. 176-186, dic. 2017. ISSN 1697-2791
- Laureti, F., & Battisti, A. (2017). Mitigation technologies for counteracting the UHI effects and for improving outdoor thermal comfort in mediterranean urban open spaces: A study of vegetation and cool materials effects on pedestrian comfort in Rome. *International conference on urban comfort and environmental quality*.
- Lazzarin RM, Castellotti F, Busato F. Experimental measurements and numerical modeling of a green roof. *Energy Build* 2005;37:1260–7.
- Lee, D., Pietrzyk, P., Donkers, S., Liem, V., van Oostveen, J., Montazeri, S., et al. (2013). Modelling and observation of heat losses from buildings: The impact of geometric

- detail on 3D heat flux modelling. Proceedings 33rd AERSel symposium" towards horizon 2020: Earth observation and social perspectives".
- LEED. U.S. Green Building Council. LEED v4 for Building Design and Construction. N.d. Web. 22 Feb. 2016. <<http://www.usgbc.org/leed>>. Información sobre LEED.
- Leung D. Y. C., Tsui, Feng Chen J. K.Y., Wing-Kin Yip, L. L. P. Vrijmoed & Chun-Ho Liu (2011) Effects of Urban Vegetation on Urban Air Quality, *Landscape Research*, 36:2, 173-188, DOI: 10.1080/01426397.2010.547570
- Ley de Aprobación Inicial-416. 2012. Implementación de Techos o Terrazas Verdes en el ámbito de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. http://boletinoficial.buenosaires.gob.ar/areas/leg_tecnica/boletinOficial/documentos/buletines/2012/08/20120813.pdf
- Li H., Meier F., Lee X., Chakraborty T., Liu J., Schaap M., Sodoudi S. (2018). Interaction between urban heat island and urban pollution island during summer in Berlin, *Science of The Total Environment*, Volume 636, 2018, Pages 818-828, ISSN 0048-9697.
- Li, W.C., Yeung, K.K. (2014). A comprehensive study of green roof performance from environmental perspective. *International Journal of Sustainable Built Environment* 1–8. doi:10.1016/j.ijbsbe.2014.05.001
- Liesecke, H.J. and H. Borgwardt. 1997. Abbau von luftschadstoffen durch extensive dachbegrünungen. *Stadt Grün* 33:245-251.
- Lin B., Yu C., Su A., Lin Y. Impact of climatic conditions on the thermal effectiveness of an extensive green roof. *Building and Environment*. Volume 67, 2013, pages 26-33, ISSN 0360-1323
- Lin, C., Yang, H., Guo, H., Mockler, T., Chen, J. & Cashmore, A.R. (1998). Enhancement of blue-light sensitivity of Arabidopsis seedlings by a blue light receptor cryptochrome 2. *Proceedings Natl Acad. Sci. USA*, 95, 2686–2690.
- Liu K, Minor J. (2005). Performance evaluation of an extensive green roof. In: Third annual greening rooftops for sustainable communities conference, Awards and Trade Show. Washington, DC; 4–6 May 2005.
- Lloyd, J. W. (1986). «A review of aridity and groundwater». *Hydrological Processes*, 1, 63-78.
- López Granados, E. M., Mendoza, M. E., Acosta, A. (2002). Cambio de cobertura vegetal y uso de la tierra. El caso de la cuenca endorreica del lago de Cuitzeo, Michoacán. *Gaceta Ecológica [en línea]* 2002, (julio-septiembre) : [Fecha de consulta: 6 de febrero de 2018] Disponible en:<<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53906403>> ISSN 1405-2849.
- Lundholm J, MacIvor JS, MacDougall Z, Ranalli M. (2010). Plant species and functional group combinations affect green roof ecosystem functions. *PLoS One* 2010;5: e9677.
- MacIvor, J. S., Margolis, L., Puncher, C. L., and Carver Matthews, J. B. (2013). “Decoupling factors affecting plant diversity and cover on extensive green roofs.” *J. Environ. Manage.*, 130, 297–305.
- Mahdavinejad, M., Salehnejad, H., & Moradi, N. (2018). An ENVI-met simulation study on influence of urban vegetation congestion on pollution dispersion. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 15(2), 187–194.
- Manual Fluke Ti 55-IR chamber 2010.

-
- Manual Kipp & Zonen. <http://www.kippzonen.com/Download/355/Manual-Pyranometers-CMP-series-Spanish>
- Martinez C. F., Cantón M. A., Roig Juárez F. A. (2014). Incidencia del déficit hídrico en el crecimiento de árboles de uso urbano en ciudades de zonas áridas. Caso de Mendoza, Argentina. *Interciencia*. December 2014, VOL. 39 N° 12. 890-897
- Martinez, C. F. (2011). Incidencia del déficit hídrico en forestales de ciudades oasis: Caso del Área Metropolitana de Mendoza, Argentina. Tesis Doctoral. Programa de Posgrado en Biología PROBIOL, Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza, Argentina. 169pp.
- Matthias A, Accioly L, Batchily A, Ferreira L, Fimbres A, Sano E, Post, D. (2000). Surface roughness effects on soil albedo. *Soil Science Society of America Journal*. 2000; 64(3):1035-1041.
- Matthias A, Sano E, Batchily A, Post D, Accioly L, Fimbres A. (1999). Measurement of albedos for small areas of soil. *Soil Science*.1999; 164(5): 293-301.
- Mavrogianni, A., Davies, M., Batty, M., Belcher, S., Bohnenstengel, S., Carruthers, D. (2011). The comfort, energy and health implications of London's urban heat island. *Building Services Engineering Research and Technology*, 32(1), 35–52.
- Maynard-Smith. J. 1978. *The Evolution of Sex*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Middel, A., Häbb, K., Brazel, A., Martin, C., & Guhathakurta, S. (2014). Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in Phoenix Local Climate Zone. *Landscape and Urban Planning*, 16-28.
- Minke G. (2009). *Techos verdes. Planificación, ejecución, consejos prácticos*. Editorial Fin de Siglo.
- Mirzaei, P. A. (2015). Recent challenges in modeling of urban heat island. *Sustainable Cities and Society*, 19, 200–206.
- Mirzaei, P. A., & Haghghat, F. (2010). Approaches to study urban heat island—abilities and limitations. *Building and Environment*, 45(10), 2192–2201.
- Molineux CJ, Fentiman CH, Gange AC. (2009). Characterising alternative recycled waste materials for use as green roof growing media in the UK. *Ecol Eng* 2009;35(10):1507–13.
- Monterusso, M.A., Rowe, D.B., Rugh, C.L., (2005). Establishment and persistence of *Sedum* spp. and native taxa for green roof applications. *Hort Science* 40, 391–396.
- Morábito J. A., Mirábito C., Salatino S. (2007). Eficiencia de riego superficial, actual y potencial, en el área de regadío del Río Mendoza (Argentina). *Ingeniería del Agua*. Vol. 14. N°3.
- Morábito, J., S. Salatino, M. Filippini, A. Bermejillo, E. Lavie. (2010). Presencia de nitratos en las aguas de los ríos Mendoza y Tunuyán superior. V Jornadas de Actualización en Riego y Fertirriego. FCA-UNCuyo, INA, INTA, CIAM y DGI de Mendoza. Mendoza 11 al 13 de agosto de 2010. 12 pp
- Morakinyo T., Dahanayake K., Ng E., Chow Ch. (2017). Temperature and cooling demand reduction by green-roof types indifferent climates and urban densities: A co-simulation parametric study. *Energy and Buildings* 145 (2017) 226–237. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.066>

- MultiSpec© (versión 9) software (2011): School of Electrical and Computer Engineering Purdue University. Recuperado de : <https://engineering.purdue.edu/~biehl/MultiSpec/>
- Nagase A, Dunnett N. Drought tolerance in different vegetation types for extensive green roofs: Effects of watering and diversity. *Landsc Urban Plan* 2010;97:318–27.
- Nagase A, Dunnett N. Drought tolerance in different vegetation types for extensive green roofs: effects of watering and diversity. *Landscape Urban Plann* 2010;97:318e27.
- Nagase, A., Dunnett, N., Choi, M.S. (2013). Investigation of weed phenology in anestablishing semi-extensive green roof. *Ecol. Eng.* 58, 156–164.
- Newman B.D., Wilcox B.P., Archer S.R., Breshears D.D., Dahm C.N., Duffy C.J., McDowell N.G., Phillips F.M., Scanlon B.R., Vivoni E.R. (2006). Ecohydrology of water-limited environments: A scientific vision. *Water Resources Research* 42: W06302. 1-15.
- Ng, E., Chen, L., Wang, Y., & Yuan, C. (2012). A study on the cooling effects of greening in a high-density city: An experience from Hong Kong. *Building and Environment*, 47, 256–271.
- Niachou A, Papakonstantinou K, Santamouris M, Tsangrassoulis A, Mihalakakou G. (2001). Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. *Energy and Buildings*. Volume 33, Issue 7, 2001, pages 719-729, ISSN 0378-7788
- Nitiu, D. S. & A. C. Mallo. 2002."Incidence of allergenic pollen of *Acer* spp., *Fraxinus* spp. and *Platanus* spp. in the city of La Plata, Argentina: preliminary results." *Aerobiologia* 18: 65-71.
- Nitiu, D. S., A. Mallo. (2002). Incidence of allergenic pollen of *Acer* spp., *Fraxinus* spp. and *Platanus* spp. in the city of La Plata, Argentina: preliminary results. *Aerobiologia* 18: 65-71.
- Nowak, D. J., & Crane, D. E. (2002). Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental Pollution*, 116, 381–389.
- Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Connelly, M., Coffman, R., Doshi, H., Dunnett, N., Gaffin, S., Köhler, M., Lui, K., Rowe, B. (2007). Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions, and services. *Bioscience* 57 (10), 823–833
- Onmura S, Matsumoto M, Hokoi S. (2001). Study on evaporative cooling effect of roof lawn gardens. *Energy Build.* 2001;33:653–66.
- Ordenanza N° 8208. 2007. Subsecretaría de Medio Ambiente de la Municipalidad de Rosario. <http://www.rosario.gov.ar/normativa/verArchivo?tipo=pdf&id=48797>
- Ordenanza N°8208. 2007. Subsecretaría de Medio Ambiente de la Municipalidad de Rosario. <http://www.rosario.gov.ar/normativa/verArchivo?tipo=pdf&id=48797>
- Ouldboukhitine SE, Belarbi R, Djedjig R (2012) Characterization of green roof components: measurements of thermal and hydrological properties. *Build Environ* 56:78–85. doi:10.1016/j.buildenv.2012.02.024
- Ouldboukhitine SE, Belarbi R, Sailor DJ. (2014). Experimental and numerical investigation of urban street canyons to evaluate the impact of green roof inside and outside buildings. *Applied Energy* 2014;114:273–282.

- Oweis, T. and Hachum, A. (2006) Water harvesting and supplemental irrigation for improved water productivity of dry farming systems in West Asia and North Africa. *Agricultural Water Management*, 80, 57-73.
- Paas, B., & Schneider, C. (2016). A comparison of model performance between ENVI-met and Austal2000 for particulate matter. *Atmospheric Environment*, 145, 392–404.
- Panasiti, A. (2000) Mendoza en el 2000, 20 pp. 171
- Parizotto S., Lamberts R. (2011). Investigation of green roof thermal performance in temperate climate: A case study of an experimental building in Florianópolis city, Southern Brazil. *Energy and Buildings*. Volume 43, Issue 7, 2011, pages 1712-1722, ISSN 0378-7788
- Parker C., Fryer J.D. (1975). Weed control problems causing major reductions in world food supplies. FAO-ACCESS.No.--32229; 28 ref.
- Parker D, Sherwin J, Sonne J, Barkaszi S. (1996). Demonstration of cooling savings of light colored roof surfacing in Florida commercial buildings: Our Saviors School. FSEC-CR-904-96.
- Parker, D., Sonne, J., Sherwin, J., "Comparative Evaluation of the Impact of Roofing Systems on Residential Cooling Energy Demand in Florida," Proceedings of ACEEE 2002 Summer Study, American Council for an Energy Efficient Economy, Washington, DC, August 2002
- Patishtán Pérez J., Rodríguez García R., Zavala García F. y Jasso Cantú D. (2010). Conductancia estomática y asimilación neta de CO₂ en Sábila (*Aloe vera* Tourn) bajo sequía. *Rev. Fitotec. Mex.* Vol. 33 (4): 305 – 314, 2010
- Peng, L. L., & Jim, C. (2013). Green-roof effects on neighborhood microclimate and human thermal sensation. *Energies*, 6(2), 598–618.
- Pereira, L. S.; Oweis, T.; Zairi, A. (2002). Irrigation management under water scarcity. *Agricultural Water Management* 57(3): 175-206.
- Pérez, Lorena Farrás. Exteriores Ecológicos 50 Soluciones para un Hogar más Sostenible. N.p.: Promopress, 2012. Impreso. Prácticas sostenibles..
- Perini, K. & Magliocco, A. (2014). Effects of vegetation, urban density, building height, and atmospheric conditions on local temperatures and thermal comfort. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13, 495–506.
- Permpituck S. y Namprakai P. (2012). The energy consumption performance of roof lawn gardens in Thailand. *Renewable Energy* 40: 98-103.
- Pisello A. L, Piselli C., Cotana F. (2015). Thermal-physics and energy performance of an innovative green roof system: The Cool-Green Roof. *Solar Energy*. Volume 116, 2015, pages 337-356, issn 0038-092x.
- Purves, W; Sadava, D; Orians, G Y Heller, H.G. (2003). Vida. La Ciencia de la Biología. Editorial Médica Panamericana. Sexta Edición. 1133p.
- Qiu Guo-yu, LI Hong-yong, ZHANG Qing-tao, CHEN Wan, LIANG Xiao-jian y LI Xiang-ze. (2013). Effects of Evapotranspiration on Mitigation of Urban Temperature by Vegetation and Urban Agriculture. *Journal of Integrative Agriculture*, 2013, n° 12, pp. 1307-1315.

-
- Raji B., Tenpierik M.J., van den Dobbelsteen A. (2015). The impact of greening systems on building energy performance: a literature review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 45 (2015) 610e623.
- Rashid R., Ahmed H. B. (2009) Thermal Performance of Rooftop Greenery system in Tropical Climate of Malaysia. A case study at a 10 storied building R.C.C flat rooftop at UTM, Johor Bahru. Malaysia Conference On Technology & Sustainability in the Built Environment.
- Razzaghmanesh M, Beecham S. (2014). The hydrological behaviour of extensive and intensive green roofs in a dry climate. *Sci Total Environ* 2014;499:284–96.
- Reagan J, Acklam D. (1979). Solar reflectivity of common building materials and its influences on the roof heat gain of typical Southwestern US residences. *Energy and Buildings.* 1979; 2(3): 237-248.
- Redondo-Brenes, A. (2007). Growth, carbon sequestration, and management of native tree plantations in humid regions of Costa Rica. *New Forests*, 34, 253–268.
- Ren, Y., Wei, X., Wei, X., Pan, J., Xie, P., Song, X., ... Zhao, J. (2011). Relationship between vegetation carbon storage and urbanization: A case study of Xiamen, China. *Forest Ecology and Management*, 261, 1214–1223.
- Reyes R. Bustamante W., Gironás J., Pastén P. A., Rojas V., Suárez F., Vera S., Victorero F., Bonilla C. A. (2016). Effect of substrate depth and roof layers on green roof temperature and water requirements in a semi-arid climate. *Ecol Eng* 2016;97:624–32.
- Riffat S, Cuce E. Aerogel with its outstanding features and building applications. In: Eleventh international conference on sustainable energy technologies; 2012. p. 2–5.
- Rodríguez G. A., Londoño Toro B. y Herrera Carrascal G. J. (2008). Ciudades ambientalmente sostenibles. Colección textos de jurisprudencia. Editorial Universidad de Rosario. ISBN 978-958-8378-47-3.
- Roig, F. (1987). Los Árboles Indígenas de la Provincias de Mendoza y San Juan. Serie Científica N° 32, 33, 34, 35.
- Roig, F. A., Gonzalez Loyarte, M. M., Abraham, E. M., Mendez, E., Roig, V. G. Y Martinez Carretero, E. (1991). Maps of desertification Hazards of Central Western Argentina, (Mendoza Province). Study case. En: UNEP, Ed. World Atlas of thematic Indicators of Desertification, E. Arnold, Londres.
- Rosatto H., 1 Villalba G., Rocca C., Meyer M., Bargiela M., Hashimoto P.,Laureda D. Pruzzo L., Kohan D., Cazorla L., Rodríguez Plaza L., Quaintenne E., Barrera D., Mazzeo N., Gamboa P., Caso C. (2013). Eficiencia en la retención del agua de lluvia de cubiertas vegetadas de tipo "extensivo" e "intensivo". *Rev. FCA UNCUYO.* 2013. 45(1): 169-183. ISSN impreso 0370-4661. ISSN (en línea) 1853-8665.
- Rosenfeld A. H., Akbari H., Romm J., and Pomerantz, M. (1998). “Cool communities: strategies for heat island mitigation and smog reduction.” *Energy and Buildings* 28 (1): 51-62
- Saadatian O, Sopian K, Salleh E, Lim CH, Riffat S, Saadatian E. (2013). A review of energy aspects of green roofs. *Renew Sustain Energy Rev* 2013;23:155–68.
- Sailor D.J., Hagos M. (2011). An updated and expanded set of thermal property data for green roof growing media. *Energy Build* 2011;43(9):2298–303.

-
- Sailor DJ. A green roof model for building energy simulation programs. *Energy Build* 2008;40(8):1466–78.
- Sailor, D. J., Elley, T. B., & Gibson, M. (2012). Exploring the building energy impacts of green roof design decisions – a modeling study of buildings in four distinct climates. *Journal of Building Physics*, 35(4), 372–391.
- Salata, F., Golasi, I., de Lieto Vollaro, R. & de Lieto Vollaro, A. (2016). Urban microclimate and outdoor thermal comfort. A proper procedure to fit ENVI-met simulation outputs to experimental data. *Sustainable Cities and Society*, 26, 318-343.
- Sánchez-Blanco, M.J., Ferrández, T., Navarro, A., Bañón, S., Alarcón, J.J. (2004). Effects of irrigation and air humidity preconditioning on water relations, growth and survival of *Rosmarinus officinalis* plants during and after transplanting. *Journal of Plant Physiology*, 161: 1133-1142.
- 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. *Solar Energy* 2014;103:682–703.
- Santamouris, M. (2007). Heat island research in Europe: The state of the art. *Advances in Building Energy Research*, 1(1), 123–150.
- Santamouris, M., Cartalis, C., Synnefa, A., & Kolokotsa, D. (2015). On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings—A review. *Energy and Buildings*, 98, 119–124.
- Santamouris, M., Papanikolaou, N., Livada, I., Koronakis, I., Georgakis, C., Argiriou, A., Assimakopoulos, D.N. (2001). On the impact of urban climate to the energy consumption of buildings. *Solar Energy* 70 (3), 201–216.
- Sanyé Mengual, E. (2015). Tesi doctoral - Universitat Autònoma de Barcelona. Institut de Ciència i Tecnologia Ambientals, 2015. Sustainability assessment of urban rooftop farming using an interdisciplinary approach
- Savio P., Rosenzweig C. Sokecki W.D., Slosberg R. B. (2006). Mitigating New York City’s Heat Island with Urban Forestry, Living Roof and Light Surfaces. New York City Regional Heat Island Initiative. The New York State Energy Research and Development Authority, Albany, NY.
- Scarduelli, F.A., Westphal, F. S. Y Lamberts, R. (2009). Aplicacao do Método BESTEST no Energyplus para treinamento em simulacao do desempenho térmico de edificacoes. s.l. : ENCAC-ENLACAC. pp. 1796-1805.
- Schulte, A.; C. Rojas; R. Rojas. (1992). Reforestación y Agroforestería en Los Andes. Uso sostenido, conservación y restauración de suelos con árboles y arbustos nativos. 1. Apuntes sobre el molle (*Schinus molle* L.). Ed. ETSFOR- FUPAGEMA- AGRUCO-ECO, Bolivia. 74p.
- Schwarz, T. (2005). Worauf es bei der Pflanzenauswahl ankommt - Pflanzen für extensive Dachbegrünungen, 2005.
- Searles P. S., Caldwell M. M., Winter K. (1995). The response of five tropical dicotyledon species to solar ultraviolet-B radiation. *American Journal of Botany. Ecology and Phytogeography*. Volume82, Issue4, April 1995. Pages 445-453.

- Sendo T, Kanechi M, Uno Y, Inagaki N. Evaluation of growth and green coverage of ten ornamental species for planting as urban rooftop greening. *J Jpn Soc Hortic Sci* 2010;79:69e76.
- Sharma A, Conry P., Fernando HJS. (2016). Green and cool roofs to mitigate urban heat island effects in the Chicago metropolitan area: evaluation with a regional climate model. *Environ Res Lett* 2016;11(6):064004.
- Shashua-Bar L, Hoffman ME. Quantitative evaluation of passive cooling of the UCL microclimate in hot regions in summer, case study: urban streets and courtyards with trees. *Build Environ* 2004;39(9):1087e99. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2003.11.007>.
- Silva A. S., Ghisi E. (2014) Uncertainty analysis of user behaviour and physical parameters in residential building performance simulation. *Energy and Buildings*. Volume 76, 2014, pages 381-391, ISSN 0378-7788.
- Silva C. M., Gomes M. G., Silva M. (2016). Green roofs energy performance in Mediterranean climate. *Energy and Buildings*. Volume 116, 2016, pages 318-325, ISSN 0378-7788.
- Skelhorn, C., Lindley, S., & Levermore, G. (2014). The impact of vegetation types on air and surface temperatures in a temperate city: A fine scale assessment in Manchester, UK. *Landscape and Urban Planning*, 121, 129–140.
- Smith K., Roeber P. (2011). Green roof mitigation potential for a proxy future climate scenario in Chicago, Illinois. *Journal Applied Meteorology and Climatology*. 50: 507-522.
- Snodgrass, E.C., Snodgrass, L.L. (2006). *Green roof plants: a resource and planting guide*. Portland, Or [etc.] : Timber. ISBN 0881927872; 9780881927870
- Sosa M. B., Correa Cantaloube E. and Cantón M. A. (2017). Forma urbana y comportamiento térmico exterior. Un estudio para reducir la isla de calor urbana en una ciudad árida. *Estudios del Hábitat* 15 (2): 1-12.
- Squier M., Davidson C. I. (2016). Heat flux and seasonal thermal performance of an extensive green roof. *Building and Environment*. Volume 107, 2016, Pages 235-244, ISSN 0360-1323.
- Stocco, S. (Febrero de 2016). Impacto de la morfología y materialidad de las plazas en la calidad energético-ambiental de ciudades emplazadas en zonas áridas. Mendoza: Universidad Tecnológica Nacional.
- Stovin, V., Poë, S., & Berretta, C. (2013). A modelling study of long term green roof retention performance. *Journal of Environmental Management*, 131, 206–215.
- Strasburger, E. et al. (1994). *Tratado de Botánica*. Ed. Omega, S.A. 8ª edición. Barcelona.
- Susca, T., Gaffin, S.R., Dell’Osso, G.R. (2011). Positive effects of vegetation: urban heat island and green roofs. *Environ. Pollut.* 159 (8–9), 2119–2126
- Sutton R. K., Harrington J. A., Skabelund L., MacDonagh P., Coffman R. R., Koch G. (2012) PRAIRIE-BASED GREEN ROOFS: LITERATURE, TEMPLATES, AND ANALOGS. *Journal of Green Building: Winter 2012*, Vol. 7, No. 1, pp. 143-172.
- Tabares-Velasco PC, Griffith B. (2012). Diagnostic test cases for verifying surface heat transfer algorithms and boundary conditions in building energy simulation programs. *J Build Perform Simul* 2012;5(5):329–46.

-
- Taiz, L. y Zeiger, E. 2002. Fisiología del estrés. En: Fisiología Vegetal (Vol.II). Universitat Jaume I, Castelló de la Plana.
- Taleghani, M., & Berardi, U. (2017). The effect of pavement characteristics on pedestrians' thermal comfort in Toronto. *Urban Climate*.
- Tang X., Qu M. (2016). Phase change and thermal performance analysis for green roofs in cold climates. *Energy and Buildings*. Volume 121, 2016, pages 165-175, ISSN 0378-7788.
- Teemusk A., Mander Ü. (2009). Greenroof potential to reduce temperature fluctuations of a roof membrane: A case study from Estonia, *Building and Environment*, Volume 44, Issue 3, 2009, pages 643-650, ISSN 0360-1323
- Tevini M., Teramura A. H. (1989). UV-B EFFECTS ON TERRESTRIAL PLANTS. *Photochemistry and Photobiology*. Volume 50, Issue 4. October 1989. Pages 479-487
- Theodosiou, T. G. 2003. Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique *Energy and Buildings* 35 (2003) 909–917. doi:10.1016/S0378-7788(03)00023-9
- Timmerman, J. G. (2005) The need for participatory processes and its implications for water management information. *Regional Environmental Change* 5:162–163. doi:10.1007/s10113-004-0090-y
- Ting, I.P., (1985). Crassulacean acid metabolism. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 36, 595–622.
- Toparlar, Y., Blocken, B., Maiheu, B., & van Heijst, G. (2017). A review on the CFD analysis of urban microclimate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1613–1640.
- Tsoka S., Tsikaloudaki A., Theodosiou T. (2018). Analyzing the ENVI-met microclimate model's performance and assessing cool materials and urban vegetation applications—A review. *Sustainable Cities and Society* 43 (2018) 55–76
- Tsoka, S., Tolika, K., Theodosiou, T., Tsikaloudaki, K., & Bikas, D. (2018). A method to account for the urban microclimate on the creation of 'typical weather year' datasets for building energy simulation, using stochastically generated data. *Energy and Buildings*, 165, 270–283.
- Tumini, I. (2012). El microclima urbano de los espacios abiertos. Estudio de casos en Madrid. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
- Tzoulas, K., Korpela, K., Venn, S., Yli-Pelkonen, V., Kaźmierczak, A., Niemela, J., et al. (2007). Promoting ecosystem and human health in urban areas using Green Infrastructure: A literature review. *Landscape and Urban Planning*, 81(3), 167–178.
- UNEP. (1997). *World Atlas of Desertification*. 2nd Edition. United Nations Environment Programme. Nairobi (Kenya).
- Van Mechelen, C., Dutoit, T., Hermy, M. (2015). Adapting green roof irrigation practices for a sustainable future: A review. *Sustainable Cities and Society* 19, 74–90. doi:10.1016/j.scs.2015.07.007
- Vardoulakis, E., Karamanis, D., Fotiadi, A., & Mihalakakou, G. (2013). The urban heat island effect in a small Mediterranean city of high summer temperatures and cooling energy demands. *Solar Energy*, 94, 128–144.

- Vásquez A. E. (2016). Infraestructura verde, servicios ecosistémicos y sus aportes para enfrentar el cambio climático en ciudades: el caso del corredor ribereño del río Mapocho en Santiago de Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 63: 63-86 (2016).
- Vera S., Pinto C., Tabares-Velasco P. C., Bustamante W., Victorero F., Gironás J., Bonilla C. A. (2017). Influence of vegetation, substrate, and thermal insulation of an extensive vegetated roof on the thermal performance of retail stores in semiarid and marine climates. *Energy Build* 2017;146(Supplement C):312–21.
- Vera S., Pinto C., Victorero F., Bustamante W., Bonilla C., Gironás J., Rojas V. (2015). Influence of plant and substrate characteristics of vegetated roofs on a supermarket energy performance located in a semiarid climate. *Energy Proc* 2015;78(Supplement C):1171–6.
- Vera S., Pinto, C.; Tabares-Velasco, P.C.; Bustamante, W.; Victorero, F.; Gironás, J.; Bonilla, C.A. (2018). Impact of the substrate thermal inertia on the thermal behaviour of an extensive vegetative roof in a semiarid climate. In: *International building physics conference: healthy, intelligent and resilient buildings and urban environments*; 2018. Syracuse, NY, USA.
- Vestrella, A., Save, R., Biel, C. (2015). An experimental study in simulated green roof in mediterranean climate, 7, 95e111. <https://doi.org/10.5539/jas.v7n4p95>.
- Vijayaraghavan K, Raja FD. Design and development of green roof substrate to improve runoff water quality: Plant growth experiments and adsorption. *Water Res* 2014;63:94–101.
- Vijayaraghavan K., (2016). Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 57, 2016, pages 740-752, ISSN 1364-0321.
- Vijayaraghavan KU, Joshi M, Balasubramanian R. (2012). A field study to evaluate runoff quality from green roofs. *Water Res* 2012;46:1337–45.
- Villagra P. E., Giordano C., Alvarez J. A., Cavagnaro J. B., Guevara A., Sartor C., Passera C. B. y Greco S. (2011). Ser planta en el desierto: estrategias de uso de agua y resistencia al estrés hídrico en el Monte Central de Argentina. *Ecología Austral* 21:29-42. Abril 2011. Asociación argentina de ecología.
- Villalba R. (2006). Cambio climático. Calentamiento global y cambios climáticos regionales.
- Virk G., Jansz A., Mavrogianni A., Mylona A., Stocker J. (2015). Microclimatic effects of green and cool roofs in London and their impacts on energy use for a typical office building. *Energy Build* 2015;88(Supplement C):214–28.
- Vos, P. E., Maiheu, B., Vankerkom, J., & Janssen, S. (2013). Improving local air quality in cities: to tree or not to tree? *Environmental Pollution*, 183, 113–122.
- Voyde E.; Fassman E., Simcock R., Wells J. (2010). Quantifying Evapotranspiration Rates for New Zealand Green Roofs. *J. Hydrol. Eng.* (16)(Jun 6) 395-403. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000141](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000141)
- Wang Y., Bakker F., de Groot R. y Wörtche H. (2014). Effect of ecosystem services provided by urban green infrastructure on indoor environment: A literature review. *Building and Environment*. 77 (2014) 88-100

- Wang Z-H, Zhao X, Yang J, Song J. (2016). Cooling and energy saving potentials of shade trees and urban lawns in a desert city. *Appl Energy* 2016;161:437–44.
- Wang, Y.-C., & Lin, J.-C. (2012). Air quality enhancement zones in Taiwan: A carbon reduction benefit assessment. *Forest Policy and Economics*, 23, 40–45.
- Wang, Z., Bou-Zeid, E. and Smith, J. A. (2013), A coupled energy transport and hydrological model for urban canopies evaluated using a wireless sensor network. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 139: 1643-1657. doi:10.1002/qj.2032
- Wania, A., Bruse, M., Blond, N., & Weber, C. (2012). Analysing the influence of different street vegetation on traffic-induced particle dispersion using microscale simulations. *Journal of Environmental Management*, 94(1), 91–101.
- Wilcox B.P., Breshears D.D., Seyfried M.S. (2003). Water balance on rangelands. In Stewart BA, TA Howell TA eds. *Encyclopedia of Water Science*. New York, USA. Marcel Dekker. p. 791-794.
- Williams N. S. G., Rayner J. P., Raynor K. J. (2010) Green roofs for a wide brown land: Opportunities and barriers for rooftop greening in Australia. *Urban Forestry & Urban Greening*. Volume 9, Issue 3, 2010, pages 245-251, ISSN 1618-8667
- Winter, K., Smith, J.A.C., (1996). *Crassulacean Acid Metabolism: Biochemistry, Ecology, Physiology and Evolution*. Springer-Verlag, Berlin.
- Wong JKW, Lau LS-K. (2013). From the ‘urban heat island’ to the ‘green island’? A preliminary investigation into the potential of retrofitting green roofs in Mongkok district of Hong Kong *Habitat Int* 2013;39:25–35.
- Wong N. H., Chen Y., Ong C. L., Sia A. (2003). Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment. *Building and Environment*. Volume 38, Issue 2, 2003, pages 261-270, ISSN 0360-1323
- Wootton-Beard PC, Xing Y, Durai Prabhakaran RT, Robson P, Bosch M, Thornton JM. (2016). Improving the impact of plant science on urban planning and design. *Buildings* 2016;6:48.
- Xiao M., Lin Y., Han J., Zhang G. (2014). A review of green roof research and development in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 40, 2014, pages 633-648, ISSN 1364-0321.
- Yaghoobian N. and Srebric J. (2015). Influence of plant coverage on the total green roof energy balance and building energy consumption. *Energy and Buildings* 103(2015)1–13
- Yang, J., McBride, J., Zhou, J., & Sun, Z. (2005). The urban forest in Beijing and its role in air pollution reduction. *Urban Forestry & Urban Greening*, 3, 65–78.
- Yang, X., Zhao, L., Bruse, M., & Meng, Q. (2012). An integrated simulation method for building energy performance assessment in urban environments. *Energy and Buildings*, 54, 243–251.
- Zhang, H. and Oweis, T. (1999) Water-Yield Relations and Optimal Irrigation Scheduling of Wheat in the Mediterranean Region. *Agricultural Water Management*, 38, 195-211. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3774\(98\)00069-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3774(98)00069-9)
- Zhao M., Tabares-Velasco P. C., Srebric J., Komarneni S., and Berghage R. (2014). Effects of plant and substrate selection on thermal performance of green roofs during the summer. *Building and Environment* 78 (2014) 199e211

- Zinzi, M., & Agnoli, S. (2012). Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region. *Energy and Buildings*, 55, 66–76. doi:10.1016/j.enbuild.2011.09.024
- Zölch, T., Maderspacher, J., Wamsler, C., & Pauleit, S. (2016). Using green infrastructure for urban climate-proofing: An evaluation of heat mitigation measures at the microscale. *Urban Forestry & Urban Greening*, 20, 305–316.

ANEXOS

SALIDA DEL SOFTWARE MULTISPECT PARA PROCESAMIENTO DE IMÁGENES. EJEMPLO DE CÁLCULO DE COBERTURA DE *APTENIA CORDIFOLIA* PARA LA TEMPORADA DE VERANO 2014-2015.

Y

 Display 'Aptenia.JPG' 06-04-2015 11:24:33 (MultiSpecWin32_9.17.2013)

1 CPU seconds for displaying image. 06-04-2015 11:24:34

 MultiSpec Classification

Classify 06-04-2015 11:37:51 (MultiSpecWin32_9.17.2013)

Input Parameters:

Project = 'Untitled Project'
 Original class statistics are used.
 Base image file = 'Aptenia.JPG'
 Image start line and column = 1, 1
 Target image file = 'Aptenia.JPG'
 Maximum likelihood classifier used.

Channels used: 1-3

Number classes = 6

Number classes used = 6

Classes used:	Weight
1: Piso	10.000
2: Geotextil	10.000
3: Plástico	10.000
4: Flor	10.000
5: Planta	10.000
6: Tierra	10.000

Training Fields Used: (line interval = 1; column interval = 1)

Field name	Class	First		Last	
		Line	Line	Col.	Col.
1: Field 1	1	10	12	1077	1078
2: Field 2	1	3	4	1073	1075
3: Field 3	1	25	26	1073	1075
4: Field 4	1	8	9	1696	1698
5: Field 5	1	13	14	1686	1688

6: Field 6	1	5	6	1876	1878
7: Field 7	1	15	16	1894	1896
8: Field 8	1	5	7	1809	1810
9: Field 9	1	31	32	1807	1809
10:Field 10	1	2	3	2475	2477
11:Field 11	2	211	212	1023	1025
12:Field 12	2	224	226	1011	1012
13:Field 13	2	235	237	921	922
14:Field 14	2	446	447	1055	1057
15:Field 15	2	196	197	1678	1680
16:Field 16	2	1202	1203	1825	1827
17:Field 17	2	2216	2217	2743	2745
18:Field 18	2	2229	2230	2716	2718
19:Field 19	2	2074	2075	974	976
20:Field 20	2	2045	2046	11	13
21:Field 21	3	100	101	2592	2594
22:Field 22	3	27	28	2657	2659
23:Field 23	3	20	21	2517	2519
24:Field 24	3	235	236	2633	2635
25:Field 25	3	130	131	2620	2622
26:Field 26	3	281	283	2640	2641
27:Field 27	3	158	160	2748	2749
28:Field 28	3	635	636	2748	2750
29:Field 29	3	42	43	86	88
30:Field 30	3	445	447	49	50
31:Field 31	4	1325	1326	1051	1053
32:Field 32	4	1341	1342	1049	1051
33:Field 33	4	811	812	1175	1177
34:Field 34	4	811	812	1158	1160
35:Field 35	4	237	238	505	507
36:Field 36	4	252	253	515	517
37:Field 37	4	819	820	669	671
38:Field 38	4	812	813	650	652
39:Field 39	4	2119	2120	1919	1921
40:Field 40	4	2103	2104	1911	1913
41:Field 41	5	741	742	462	464
42:Field 42	5	134	135	277	279
43:Field 43	5	389	390	1324	1326
44:Field 44	5	416	417	1335	1337
45:Field 45	5	235	236	2031	2033
46:Field 46	5	259	260	2016	2018
47:Field 47	5	1859	1860	502	504
48:Field 48	5	1868	1869	501	503

49:Field 49	5	1144	1146	159	160
50:Field 50	5	1162	1163	180	182
51:Field 51	6	1334	1335	2055	2057
52:Field 52	6	1343	1344	2048	2050
53:Field 53	6	1753	1754	2061	2063
54:Field 54	6	1739	1741	2045	2046
55:Field 55	6	1759	1760	2046	2048
56:Field 56	6	1698	1699	2028	2030
57:Field 57	6	1711	1712	2032	2034
58:Field 58	6	1285	1286	2062	2064
59:Field 59	6	1293	1294	2040	2042
60:Field 60	6	1104	1105	1558	1560

Output Information:

Classification of Training Fields

TRAINING CLASS PERFORMANCE (Resubstitution Method)

Project Class Name	Reference Class Number	Accuracy+ (%) Samples	Number of Samples in Class						
			Number	1 Piso	2 Geotextil	3 Plástico	4 Flor	5 Planta	6 Tierra
Piso	1	100.0	60	60	0	0	0	0	0
Geotextil	2	85.0	60	0	51	9	0	0	0
Plástico	3	43.3	60	0	22	26	0	0	12
Flor	4	100.0	60	0	0	0	60	0	0
Planta	5	100.0	60	0	0	0	0	60	0
Tierra	6	100.0	60	0	0	0	0	0	60
TOTAL			360	60	73	35	60	60	72
Reliability Accuracy (%)*				100.0	69.9	74.3	100.0	100.0	

83.3

OVERALL CLASS PERFORMANCE (317 / 360) = 88.1%

Kappa Statistic (X100) = 85.7%. Kappa Variance = 0.000414.

+ (100 - percent omission error); also called producer's accuracy.

* (100 - percent commission error); also called user's accuracy.

Area classification saved to disk as 'Aptenia.gis'.

Classification of Selected Area

Lines 1 to 2535 by 1. Columns 1 to 2780 by 1

CLASS DISTRIBUTION FOR SELECTED AREA

Class	Number	
	Samples	Percent
1 Piso	553,287	7.9
2 Geotextil	518,050	7.4
3 Plástico	397,906	5.6
4 Flor	290,338	4.1
5 Planta	5,076,597	72.0
6 Tierra	211,122	3.0
Total	7,047,300	100.0

Total number of equal distances to classes: 0.

End maximum likelihood classification

5 CPU seconds for classification. 06-04-2015 11:38:28

Display 'Aptenia.gis' 06-04-2015 11:38:47 (MultiSpecWin32_9.17.2013)

0 CPU seconds for displaying image. 06-04-2015 11:38:47

'Aptenia.gis' image window saved as TIFF file -'Aptenia.tif'.

Class information for 'Aptenia.gis' was saved to 'Aptenia.trl'.

ANAVA CONDUCTANCIA ESTOMÁTICA AÑO 2016

Nueva tabla : 03/07/2018 - 14:21:54 - [Versión : 02/03/2018]

Análisis de la varianza

<u>Especie</u>	<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R² Aj</u>	<u>CV</u>
Aptenia cordifolia	CE	mmol/m2s	32	0.13	0.10 108.31

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo.	42042.75	1	42042.75	4.40	0.0445
Momento	42042.75	1	42042.75	4.40	0.0445
Error	286753.10	30	9558.44		
<u>Total</u>	<u>328795.85</u>	<u>31</u>			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=70.59308

Error: 9558.4367 gl: 30

Momento Medias n E.E.

PrevioR 54.02 16 24.44 A

PosteriorR 126.51 16 24.44 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Especie Variable N R² R² Aj CV
Cynodon dactylon CE mmol/m²s 31 1.8E-03 0.00 70.69

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V. SC gl CM F p-valor
 Modelo. 18.60 1 18.60 0.05 0.8195
 Momento 18.60 1 18.60 0.05 0.8195
 Error 10175.72 29 350.89
Total 10194.32 30

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=13.76895

Error: 350.8869 gl: 29

Momento Medias n E.E.

PosteriorR 25.75 16 4.68 A

PrevioR 27.30 15 4.84 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Especie Variable N R² R² Aj CV
Gazania rigens CE mmol/m²s 20 0.42 0.39 54.82

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V. SC gl CM F p-valor
 Modelo. 2667.75 1 2667.75 13.19 0.0019
 Momento 2667.75 1 2667.75 13.19 0.0019
 Error 3641.44 18 202.30
Total 6309.19 19

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=13.63923

Error: 202.3024 gl: 18

Momento Medias n E.E.

PrevioR 11.80 8 5.03 A

PosteriorR 35.38 12 4.11 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Especie Variable N R² R² Aj CV
Hyalis argentea CE mmol/m²s 32 0.08 0.05 93.30

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V. SC gl CM F p-valor
 Modelo. 9580.74 1 9580.74 2.63 0.1152
 Momento 9580.74 1 9580.74 2.63 0.1152
 Error 109179.62 30 3639.32
Total 118760.36 31

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=43.55909

Error: 3639.3206 gl: 30

Momento Medias n E.E.

PrevioR 47.36 16 15.08 A

PosteriorR 81.96 16 15.08 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Especie Variable N R² R² Aj CV
Lampranthus multiradiatus CE mmol/m²s 32 0.04 0.01 72.11

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V. SC gl CM F p-valor
 Modelo. 389.90 1 389.90 1.29 0.2654
 Momento 389.90 1 389.90 1.29 0.2654
 Error 9082.14 30 302.74
Total 9472.04 31

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=12.56326

Error: 302.7381 gl: 30

Momento Medias n E.E.

PrevioR 20.64 16 4.35 A

PosteriorR 27.62 16 4.35 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Especie Variable N R² R² Aj CV
Nassella tenuissima CE mmol/m²s 32 0.11 0.08 60.13

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V. SC gl CM F p-valor
 Modelo. 755.63 1 755.63 3.64 0.0659
 Momento 755.63 1 755.63 3.64 0.0659
 Error 6224.31 30 207.48
Total 6979.94 31

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=10.40048

Error: 207.4769 gl: 30

Momento Medias n E.E.

PrevioR 19.09 16 3.60 A

PosteriorR 28.81 16 3.60 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Especie Variable N R² R² Aj CV
Sedum acre CE mmol/m²s 32 0.01 0.00 79.39

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V. SC gl CM F p-valor
 Modelo. 4848.66 1 4848.66 0.30 0.5904
 Momento 4848.66 1 4848.66 0.30 0.5904
 Error 491491.46 30 16383.05
Total 496340.12 31

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=92.42002

Error: 16383.0486 gl: 30

Momento Medias n E.E.

PrevioR 148.91 16 32.00 A

PosteriorR 173.53 16 32.00 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Especie Variable N R² R² Aj CV
Sedum lineare CE mmol/m²s 32 0.17 0.14 89.16

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V. SC gl CM F p-valor
 Modelo. 273633.53 1 273633.53 6.08 0.0197
 Momento 273633.53 1 273633.53 6.08 0.0197
 Error 1351128.95 30 45037.63
Total 1624762.47 31

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=153.23447

Error: 45037.6316 gl: 30

Momento Medias n E.E.

PrevioR 145.56 16 53.06 A

PosteriorR 330.51 16 53.06 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Especie Variable N R² R² Aj CV
Sedum spectabile CE mmol/m²s 32 0.01 0.00 83.08

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V. SC gl CM F p-valor
 Modelo. 80.65 1 80.65 0.21 0.6509
 Momento 80.65 1 80.65 0.21 0.6509
 Error 11582.12 30 386.07
Total 11662.76 31

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=14.18737

Error: 386.0705 gl: 30

Momento Medias n E.E.

PrevioR 22.06 16 4.91 A

PosteriorR 25.24 16 4.91 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

ANAVA CONDUCTANCIA ESTOMÁTICA AÑO 2017

Nueva tabla : 03/07/2018 - 13:08:00 - [Versión : 02/03/2018]

Análisis de la varianza

Especie	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
<u>Aptenia cordifolia</u>	CE	mmol/m ² s	56	1.2E-03	0.00 113.80

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	2154.30	1	2154.30	0.06	0.8031
Momento	2154.30	1	2154.30	0.06	0.8031
Error	1852972.81	54	34314.31		
<u>Total</u>	<u>1855127.11</u>	<u>55</u>			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=100.28576

Error: 34314.3114 gl: 54

Momento Medias n E.E.

PrevioR 155.62 24 37.81 A

PosteriorR 168.15 32 32.75 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Especie	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
<u>Cynodon dactylon</u>	CE	mmol/m ² s	56	0.20	0.19 44.68

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	745.93	1	745.93	13.85	0.0005
Momento	745.93	1	745.93	13.85	0.0005
Error	2909.22	54	53.87		
<u>Total</u>	<u>3655.15</u>	<u>55</u>			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=3.97368

Error: 53.8745 gl: 54

Momento Medias n E.E.

PrevioR 12.21 24 1.50 A

PosteriorR 19.59 32 1.30 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Especie	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
<u>Gazania rigens</u>	CE	mmol/m ² s	28	0.02	0.00 122.00

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	543.66	1	543.66	0.54	0.4705
Momento	543.66	1	543.66	0.54	0.4705
Error	26354.13	26	1013.62		
<u>Total</u>	<u>26897.79</u>	<u>27</u>			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=24.99135

Error: 1013.6203 gl: 26

Momento Medias n E.E.

PrevioR 21.01 12 9.19 A

PosteriorR 29.91 16 7.96 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Especie	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
<u>Hyalis argentea</u>	CE	mmol/m ² s	56	0.26	0.25 65.54

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	1896.45	1	1896.45	19.03	0.0001
Momento	1896.45	1	1896.45	19.03	0.0001
Error	5381.69	54	99.66		
<u>Total</u>	<u>7278.14</u>	<u>55</u>			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=5.40461

Error: 99.6609 gl: 54

Momento Medias n E.E.

PrevioR 8.51 24 2.04 A

PosteriorR 20.27 32 1.76 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

<u>Especie</u>	<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R² Aj</u>	<u>CV</u>
Lampranthus	multiradiatus	CE	mmol/m2s	40	0.04 0.01 112.21

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V. SC gl CM F p-valor

Modelo. 23.88 1 23.88 1.58 0.2159

Momento 23.88 1 23.88 1.58 0.2159

Error 572.78 38 15.07

Total 596.66 39

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=2.53665

Error: 15.0731 gl: 38

Momento Medias n E.E.

PrevioR 2.83 24 0.79 A

PosteriorR 4.41 16 0.97 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

<u>Especie</u>	<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R² Aj</u>	<u>CV</u>
Nassella	tenuissima	CE	mmol/m2s	40	0.02 0.00 164.64

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V. SC gl CM F p-valor

Modelo. 2.36 1 2.36 0.59 0.4454

Momento 2.36 1 2.36 0.59 0.4454

Error 150.82 38 3.97

Total 153.18 39

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=1.30164

Error: 3.9688 gl: 38

Momento Medias n E.E.

PosteriorR 0.91 16 0.50 A

PrevioR 1.41 24 0.41 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

<u>Especie</u>	<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R² Aj</u>	<u>CV</u>
Sedum	acre	CE	mmol/m2s	56	0.01 0.00 73.61

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V. SC gl CM F p-valor

Modelo. 8897.33 1 8897.33 0.49 0.4857

Momento 8897.33 1 8897.33 0.49 0.4857

Error 974900.93 54 18053.72

Total 983798.26 55

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=72.74196

Error: 18053.7210 gl: 54

Momento Medias n E.E.

PrevioR 167.99 24 27.43 A

PosteriorR 193.46 32 23.75 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

<u>Especie</u>	<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R² Aj</u>	<u>CV</u>
Sedum	lineare	CE	mmol/m2s	56	0.01 0.00 97.29

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V. SC gl CM F p-valor

Modelo. 13283.26 1 13283.26 0.49 0.4885

Momento 13283.26 1 13283.26 0.49 0.4885

Error 1474612.52 54 27307.64

Total 1487895.78 55

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=89.46305

Error: 27307.6392 gl: 54

Momento Medias n E.E.

PrevioR 152.06 24 33.73 A

PosteriorR 183.18 32 29.21 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Especie	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Sedum spectabile	CE	mmol/m2s	56	1.2E-03	0.00 119.69

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)F.V. SC gl CM F p-valor

Modelo. 0.21 1 0.21 0.06 0.8035

Momento 0.21 1 0.21 0.06 0.8035

Error 184.99 54 3.43

Total 185.20 55**Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=1.00201**

Error: 3.4256 gl: 54

Momento Medias n E.E.

PrevioR 1.48 24 0.38 A

PosteriorR 1.60 32 0.33 A

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)***ANAVA CONDUCTANCIA ESTOMÁTICA AÑO 2018**

Nueva tabla : 03/07/2018 - 13:04:28 - [Versión : 02/03/2018]

Análisis de la varianza

Especie	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Aptenia cordifolia	CE	mmol/m2s	32	4.1E-04	0.00 120.56

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)F.V. SC gl CM F p-valor

Modelo. 75.64 1 75.64 0.01 0.9127

Momento 75.64 1 75.64 0.01 0.9127

Error 185768.28 30 6192.28

Total 185843.93 31**Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=56.81903**

Error: 6192.2761 gl: 30

Momento Medias n E.E.

PosteriorR 63.73 16 19.67 A

PrevioR 66.81 16 19.67 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Especie	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Cynodon dactylon	CE	mmol/m2s	32	0.04	0.01 62.56

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)F.V. SC gl CM F p-valor

Modelo. 743.05 1 743.05 1.34 0.2559

Momento 743.05 1 743.05 1.34 0.2559

Error 16615.04 30 553.83

Total 17358.09 31**Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=16.99256**

Error: 553.8346 gl: 30

Momento Medias n E.E.

PrevioR 32.80 16 5.88 A

PosteriorR 42.44 16 5.88 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Especie	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Gazania rigens	CE	mmol/m2s	8	4.4E-03	0.00 103.28

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo.	100.82	1	100.82	0.03	0.8763
Momento	100.82	1	100.82	0.03	0.8763
Error	22946.44	6	3824.41		
Total	23047.26	7			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=107.00037

Error: 3824.4058 gl: 6

Momento Medias n E.E.

PrevioR 56.33 4 30.92 A

PosteriorR 63.43 4 30.92 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

<u>Especie</u>	<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R² Aj</u>	<u>CV</u>
<u>Hyalis argentea</u>	<u>CE mmol/m2s</u>	<u>21</u>	<u>0.42</u>	<u>0.39</u>	<u>37.89</u>

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo.	8566.31	1	8566.31	13.83	0.0015
Momento	8566.31	1	8566.31	13.83	0.0015
Error	11771.55	19	619.56		
Total	20337.86	20			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=26.69186

Error: 619.5552 gl: 19

Momento Medias n E.E.

PosteriorR 54.40 16 6.22 A

PrevioR 101.82 5 11.13 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

<u>Especie</u>	<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R² Aj</u>	<u>CV</u>
<u>Lampranthus multiradiatus</u>	<u>CE mmol/m2s</u>	<u>28</u>	<u>0.10</u>	<u>0.07</u>	<u>99.70</u>

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo.	9701.77	1	9701.77	2.93	0.0988
Momento	9701.77	1	9701.77	2.93	0.0988
Error	86049.33	26	3309.59		
Total	95751.10	27			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=44.69529

Error: 3309.5898 gl: 26

Momento Medias n E.E.

PosteriorR 39.09 14 15.38 A

PrevioR 76.31 14 15.38 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

<u>Especie</u>	<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R² Aj</u>	<u>CV</u>
<u>Nassella tenuissima</u>	<u>CE mmol/m2s</u>	<u>29</u>	<u>0.06</u>	<u>0.03</u>	<u>81.62</u>

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

<u>F.V.</u>	<u>SC</u>	<u>gl</u>	<u>CM</u>	<u>F</u>	<u>p-valor</u>
Modelo.	2788.71	1	2788.71	1.88	0.1822
Momento	2788.71	1	2788.71	1.88	0.1822
Error	40153.43	27	1487.16		
Total	42942.13	28			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=29.54529

Error: 1487.1639 gl: 27

Momento Medias n E.E.

PrevioR 36.37 13 10.70 A

PosteriorR 56.09 16 9.64 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

<u>Especie</u>	<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R² Aj</u>	<u>CV</u>
<u>Sedum acre</u>	<u>CE mmol/m2s</u>	<u>27</u>	<u>0.03</u>	<u>0.00</u>	<u>135.44</u>

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	17312.74	1	17312.74	0.87	0.3595
Momento	17312.74	1	17312.74	0.87	0.3595
Error	496728.54	25	19869.14		
Total	514041.28	26			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=111.81644

Error: 19869.1415 gl: 25

Momento Medias n E.E.

PrevioR 77.79 13 39.09 A

PosteriorR 128.47 14 37.67 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Especie	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Sedum lineare	CE mmol/m2s	32	0.01	0.00	147.49

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	12218.75	1	12218.75	0.35	0.5588
Momento	12218.75	1	12218.75	0.35	0.5588
Error	1048684.02	30	34956.13		
Total	1060902.77	31			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=134.99895

Error: 34956.1340 gl: 30

Momento Medias n E.E.

PrevioR 107.23 16 46.74 A

PosteriorR 146.31 16 46.74 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Especie	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Sedum spectabile	CE mmol/m2s	32	9.8E-04	0.00	82.58

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	46.80	1	46.80	0.03	0.8648
Momento	46.80	1	46.80	0.03	0.8648
Error	47593.95	30	1586.46		
Total	47640.75	31			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=28.75967

Error: 1586.4650 gl: 30

Momento Medias n E.E.

PosteriorR 47.03 16 9.96 A

PrevioR 49.44 16 9.96 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)**ANAVA TEMPERATURA DE HOJA AÑO 2016**

Nueva tabla : 15/07/2018 - 18:47:25 - [Versión : 20/07/2017]

Análisis de la varianza

Especie	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Aptenia cordifolia	Temperatura de hoja °C	32	0.43	0.41	5.10

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	100,11	1	100,11	22,51	<0,0001
Momento	100,11	1	100,11	22,51	<0,0001
Error	133,45	30	4,45		
Total	233,56	31			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=1,52287

Error: 4,4482 gl: 30

Momento Medias n E.E.

PrevioR 39,63 16 0,53 A

PosteriorR 43,16 16 0,53 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Especie	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Aristida purpurea	Temperatura de hoja °C	32	0,08	0,05	5,65

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	12,63	1	12,63	2,56	0,1202
Momento	12,63	1	12,63	2,56	0,1202
Error	148,03	30	4,93		
Total	160,66	31			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=1,60393

Error: 4,9344 gl: 30

Momento Medias n E.E.

PrevioR 38,71 16 0,56 A

PosteriorR 39,97 16 0,56 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Especie	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Cynodon dactylon	Temperatura de hoja °C	31	0,71	0,70	2,79

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	71,37	1	71,37	70,25	<0,0001
Momento	71,37	1	71,37	70,25	<0,0001
Error	29,46	29	1,02		
Total	100,83	30			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,74090

Error: 1,0160 gl: 29

Momento Medias n E.E.

PrevioR 34,52 15 0,26 A

PosteriorR 37,56 16 0,25 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Especie	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Gazania rigens	Temperatura de hoja °C	20	3,8E-03	0,00	3,86

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0,16	1	0,16	0,07	0,7950
Momento	0,16	1	0,16	0,07	0,7950
Error	41,76	18	2,32		
Total	41,93	19			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=1,46068

Error: 2,3202 gl: 18

Momento Medias n E.E.

PosteriorR 39,39 12 0,44 A

PrevioR 39,58 8 0,54 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Especie	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Hyalis argentea	Temperatura de hoja °C	32	0,19	0,16	7,75

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	72,30	1	72,30	6,91	0,0134
Momento	72,30	1	72,30	6,91	0,0134
Error	314,10	30	10,47		
Total	386,40	31			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=2,33637

Error: 10,4700 gl: 30

Momento Medias n E.E.

PrevioR 40,25 16 0,81 A

PosteriorR 43,26 16 0,81 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Especie	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Lampranthus multiradiatus	Temperatura de hoja °C	32	0,16	0,13	5,40

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	25,38	1	25,38	5,79	0,0225
Momento	25,38	1	25,38	5,79	0,0225
Error	131,61	30	4,39		
Total	156,99	31			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=1,51236

Error: 4,3871 gl: 30

Momento Medias n E.E.

PrevioR 37,89 16 0,52 A

PosteriorR 39,67 16 0,52 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Especie	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Nassella tenuissima	Temperatura de hoja °C	32	0,87	0,87	2,20

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	152,69	1	152,69	206,85	<0,0001
Momento	152,69	1	152,69	206,85	<0,0001
Error	22,14	30	0,74		
Total	174,83	31			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,62035

Error: 0,7381 gl: 30

Momento Medias n E.E.

PrevioR 36,88 16 0,21 A

PosteriorR 41,25 16 0,21 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Especie	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Sedum acre	Temperatura de hoja °C	32	0,07	0,04	4,84

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	7,90	1	7,90	2,20	0,1484
Momento	7,90	1	7,90	2,20	0,1484
Error	107,68	30	3,59		
Total	115,58	31			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=1,36798

Error: 3,5894 gl: 30

Momento Medias n E.E.

PrevioR 38,62 16 0,47 A

PosteriorR 39,61 16 0,47 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Especie	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Sedum lineare	Temperatura de hoja °C	32	0,64	0,63	3,42

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	93,85	1	93,85	53,83	<0,0001
Momento	93,85	1	93,85	53,83	<0,0001
Error	52,30	30	1,74		
Total	146,15	31			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,95340

Error: 1,7435 gl: 30

Momento Medias n E.E.

PrevioR 36,92 16 0,33 A

PosteriorR 40,34 16 0,33 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Especie	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Sedum spectabile	Temperatura de hoja °C	32	0,84	0,83	3,42

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V. SC gl CM F p-valor

Modelo. 283,22 1 283,22 155,31 <0,0001

Momento 283,22 1 283,22 155,31 <0,0001

Error 54,71 30 1,82

Total 337,93 31

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,97507

Error: 1,8236 gl: 30

Momento Medias n E.E.

PrevioR 36,54 16 0,34 A

PosteriorR 42,49 16 0,34 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Especie	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Zephyranthes candida	Temperatura de hoja °C	32	0,28	0,26	7,60

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V. SC gl CM F p-valor

Modelo. 119,74 1 119,74 11,67 0,0018

Momento 119,74 1 119,74 11,67 0,0018

Error 307,90 30 10,26

Total 427,64 31

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=2,31321

Error: 10,2634 gl: 30

Momento Medias n E.E.

PrevioR 40,21 16 0,80 A

PosteriorR 44,08 16 0,80 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

ANAVA TEMPERATURA DE HOJA AÑO 2017

Nueva tabla : 15/07/2018 - 18:49:15 - [Versión : 20/07/2017]

Análisis de la varianza

Especie	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Aptenia cordifolia	Temperatura de hoja °C	56	0,01	0,00	6,67

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V. SC gl CM F p-valor

Modelo. 4,49 1 4,49 0,62 0,4359

Momento 4,49 1 4,49 0,62 0,4359

Error 393,10 54 7,28

Total 397,59 55

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=1,46069

Error: 7,2797 gl: 54

Momento Medias n E.E.

PosteriorR 40,23 32 0,48 A

PrevioR 40,80 24 0,55 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Especie	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Aristida purpurea	Temperatura de hoja °C	4	0,00	0,00	0,57

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V. SC gl CM F p-valor
 Modelo. 0,00 0 0,00 0,00 >0,9999
 Momento 0,00 0 0,00 sd sd
 Error 0,18 3 0,06
 Total 0,18 3

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=1,46069

Error: 0,0600 gl: 3

Momento Medias n E.E.

PrevioR 42,70 4 0,12 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Especie Variable N R² R² Aj CV
 Cynodon dactylon Temperatura de hoja °C 56 0,29 0,28 10,28

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V. SC gl CM F p-valor
 Modelo. 355,40 1 355,40 21,96 <0,0001
 Momento 355,40 1 355,40 21,96 <0,0001
 Error 873,89 54 16,18
 Total 1229,29 55

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=2,17787

Error: 16,1831 gl: 54

Momento Medias n E.E.

PrevioR 36,23 24 0,82 A

PosteriorR 41,32 32 0,71 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Especie Variable N R² R² Aj CV
 Gazania rigens Temperatura de hoja °C 28 0,01 0,00 5,14

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V. SC gl CM F p-valor
 Modelo. 1,07 1 1,07 0,26 0,6114
 Momento 1,07 1 1,07 0,26 0,6114
 Error 105,60 26 4,06
 Total 106,68 27

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=1,58200

Error: 4,0617 gl: 26

Momento Medias n E.E.

PosteriorR 39,04 16 0,50 A

PrevioR 39,43 12 0,58 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Especie Variable N R² R² Aj CV
 Hyalis argentea Temperatura de hoja °C 56 3,3E-03 0,00 5,39

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V. SC gl CM F p-valor
 Modelo. 0,75 1 0,75 0,18 0,6751
 Momento 0,75 1 0,75 0,18 0,6751
 Error 229,07 54 4,24
 Total 229,82 55

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=1,11503

Error: 4,2420 gl: 54

Momento Medias n E.E.

PrevioR 38,11 24 0,42 A

PosteriorR 38,35 32 0,36 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Especie Variable N R² R² Aj CV
 Lampranthus multiradiatus Temperatura de hoja °C 40 0,09 0,06 8,24

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V. SC gl CM F p-valor

Modelo. 34,35 1 34,35 3,57 0,0664
 Momento 34,35 1 34,35 3,57 0,0664
 Error 365,42 38 9,62
Total 399,77 39

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=2,02611

Error: 9,6162 gl: 38

Momento Medias n E.E.

PosteriorR 36,49 16 0,78 A

PrevioR 38,38 24 0,63 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Especie	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Nassella tenuissima	Temperatura de hoja °C	40	2,3E-04	0,00	4,66

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V. SC gl CM F p-valor

Modelo. 0,03 1 0,03 0,01 0,9258

Momento 0,03 1 0,03 0,01 0,9258

Error 141,25 38 3,72

Total 141,28 39

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=1,25967

Error: 3,7170 gl: 38

Momento Medias n E.E.

PrevioR 41,33 24 0,39 A

PosteriorR 41,39 16 0,48 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Especie	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Sedum acre	Temperatura de hoja °C	56	0,01	0,00	4,16

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V. SC gl CM F p-valor

Modelo. 0,98 1 0,98 0,35 0,5559

Momento 0,98 1 0,98 0,35 0,5559

Error 151,12 54 2,80

Total 152,10 55

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,90566

Error: 2,7985 gl: 54

Momento Medias n E.E.

PosteriorR 40,05 32 0,30 A

PrevioR 40,32 24 0,34 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Especie	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Sedum lineare	Temperatura de hoja °C	56	0,02	3,6E-04	5,27

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V. SC gl CM F p-valor

Modelo. 4,65 1 4,65 1,02 0,3171

Momento 4,65 1 4,65 1,02 0,3171

Error 246,22 54 4,56

Total 250,87 55

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=1,15603

Error: 4,5597 gl: 54

Momento Medias n E.E.

PrevioR 40,20 24 0,44 A

PosteriorR 40,78 32 0,38 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Especie	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Sedum spectabile	Temperatura de hoja °C	56	0,11	0,10	4,06

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V. SC gl CM F p-valor

Modelo. 19,78 1 19,78 7,00 0,0107
 Momento 19,78 1 19,78 7,00 0,0107
 Error 152,60 54 2,83
 Total 172,38 55

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,91008

Error: 2,8259 gl: 54

Momento Medias n E.E.

PrevioR 40,75 24 0,34 A

PosteriorR 41,95 32 0,30 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Especie = :Zephyranthes candida (No hay datos disponibles)

ANAVA TEMPERATURA DE HOJA AÑO 2018

Nueva tabla : 15/07/2018 - 18:51:04 - [Versión : 20/07/2017]

Análisis de la varianza

<u>Especie</u>	<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R²</u>	<u>Aj</u>	<u>CV</u>
Aptenia cordifolia	Temperatura de hoja °C	16	0,47	0,43	1,39	

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V. SC gl CM F p-valor

Modelo. 4,31 1 4,31 12,44 0,0033

Momento 4,31 1 4,31 12,44 0,0033

Error 4,84 14 0,35

Total 9,15 15

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,63078

Error: 0,3460 gl: 14

Momento Medias n E.E.

PrevioR 41,79 8 0,21 A

PosteriorR 42,83 8 0,21 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Especie = :Aristida purpurea (No hay datos disponibles)

<u>Especie</u>	<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R²</u>	<u>Aj</u>	<u>CV</u>
Cynodon dactylon	Temperatura de hoja °C	16	0,11	0,05	2,19	

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V. SC gl CM F p-valor

Modelo. 1,56 1 1,56 1,72 0,2113

Momento 1,56 1 1,56 1,72 0,2113

Error 12,75 14 0,91

Total 14,31 15

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=1,02330

Error: 0,9105 gl: 14

Momento Medias n E.E.

PrevioR 43,26 8 0,34 A

PosteriorR 43,89 8 0,34 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

<u>Especie</u>	<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R²</u>	<u>Aj</u>	<u>CV</u>
Gazania rigens	Temperatura de hoja °C	4	1,00	1,00	0,00	

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V. SC gl CM F p-valor

Modelo. 2,25 1 2,25 sd sd

Momento 2,25 1 2,25 sd sd

Error 0,00 2 0,00

Total 2,25 3

<u>Especie</u>	<u>Variable</u>	<u>N</u>	<u>R²</u>	<u>R²</u>	<u>Aj</u>	<u>CV</u>
----------------	-----------------	----------	----------------------	----------------------	-----------	-----------

Hyalis argentea Temperatura de hoja °C 13 0,08 6,2E-04 4,21

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V. SC gl CM F p-valor
 Modelo. 2,33 1 2,33 1,01 0,3371
 Momento 2,33 1 2,33 1,01 0,3371
 Error 25,43 11 2,31
 Total 27,76 12

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=1,90774

Error: 2,3116 gl: 11
Momento Medias n E.E.
 PrevioR 35,58 5 0,68 A
 PosteriorR 36,45 8 0,54 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Especie Variable N R² R² Aj CV
Lampranthus multiradiatus Temperatura de hoja °C 12 0,43 0,38 1,66

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V. SC gl CM F p-valor
 Modelo. 3,85 1 3,85 7,70 0,0196
 Momento 3,85 1 3,85 7,70 0,0196
 Error 5,01 10 0,50
 Total 8,86 11

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,91024

Error: 0,5007 gl: 10
Momento Medias n E.E.
 PrevioR 41,93 6 0,29 A
 PosteriorR 43,07 6 0,29 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Especie Variable N R² R² Aj CV
Nassella tenuissima Temperatura de hoja °C 16 0,02 0,00 2,04

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V. SC gl CM F p-valor
 Modelo. 0,23 1 0,23 0,33 0,5754
 Momento 0,23 1 0,23 0,33 0,5754
 Error 9,60 14 0,69
 Total 9,83 15

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,88820

Error: 0,6860 gl: 14
Momento Medias n E.E.
 PosteriorR 40,48 8 0,29 A
 PrevioR 40,71 8 0,29 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Especie Variable N R² R² Aj CV
Sedum acre Temperatura de hoja °C 12 0,72 0,69 2,00

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V. SC gl CM F p-valor
 Modelo. 17,52 1 17,52 25,36 0,0005
 Momento 17,52 1 17,52 25,36 0,0005
 Error 6,91 10 0,69
 Total 24,43 11

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=1,06922

Error: 0,6908 gl: 10
Momento Medias n E.E.
 PrevioR 40,45 6 0,34 A
 PosteriorR 42,87 6 0,34 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Especie Variable N R² R² Aj CV

Sedum lineare Temperatura de hoja °C 16 0,62 0,59 0,89

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	3,06	1	3,06	22,63	0,0003
Momento	3,06	1	3,06	22,63	0,0003
Error	1,90	14	0,14		
Total	4,96	15			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,39454

Error: 0,1354 gl: 14

Momento Medias n E.E.

PrevioR 40,90 8 0,13 A

PosteriorR 41,78 8 0,13 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Especie	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Sedum spectabile	Temperatura de hoja °C	16	0,59	0,56	1,98

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	13,14	1	13,14	19,78	0,0006
Momento	13,14	1	13,14	19,78	0,0006
Error	9,30	14	0,66		
Total	22,44	15			

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,87398

Error: 0,6642 gl: 14

Momento Medias n E.E.

PrevioR 40,35 8 0,29 A

PosteriorR 42,16 8 0,29 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Especie = :Zephyranthes candida (No hay datos disponibles)

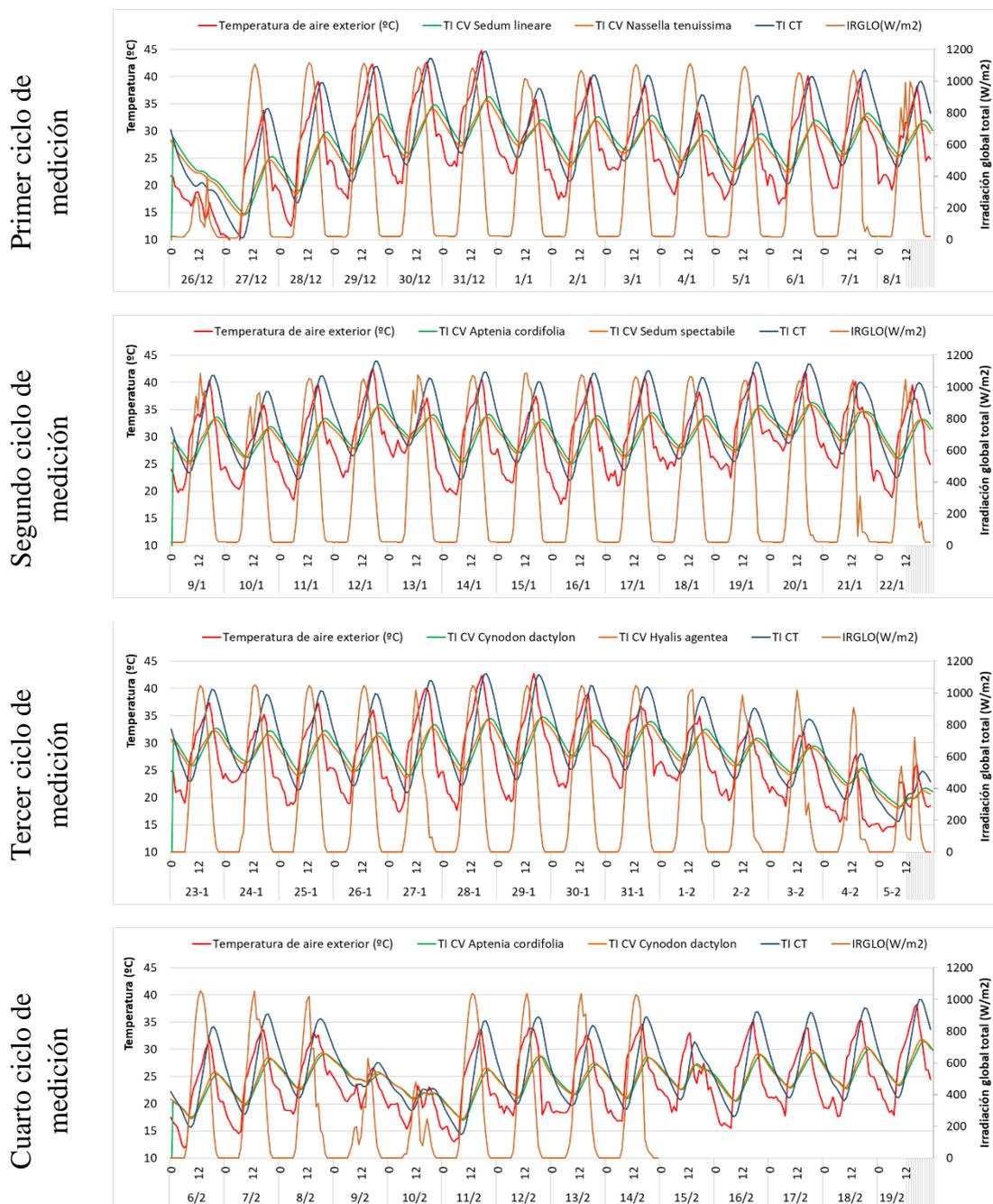
TABLA DE DATOS DE PESAJE DE CUBIERTA VEGETADA

Especie	Repetición	(A) Peso inicial por saco (kg)	(B) Peso final por saco (kg)	Peso final (kg/m ²)	(B-A) Aumento de peso por saco (kg)	Aumento de peso (kg/m ²)
<i>Aptenia cordifolia</i>	a	11,100	21,100	62,700	10,000	28,480
<i>Aptenia cordifolia</i>	b	12,420	20,300		7,880	
<i>Aptenia cordifolia</i>	c	10,700	21,300		10,600	
<i>Aristida purpurea</i>	a	12,600	22,800	67,000	10,200	29,280
<i>Aristida purpurea</i>	b	12,880	22,600		9,720	
<i>Aristida purpurea</i>	c	12,240	21,600		9,360	
<i>Cynodon dactylon</i>	a	12,160	22,500	64,800	10,340	30,200
<i>Cynodon dactylon</i>	b	11,720	21,300		9,580	
<i>Cynodon dactylon</i>	c	10,720	21,000		10,280	
<i>Gazania rigens</i>	a	12,220	21,800	57,000	9,580	20,260
<i>Gazania rigens</i>	b	12,440	18,000		5,560	
<i>Gazania rigens</i>	c	12,080	17,200		5,120	
<i>Hyalis argentea</i>	a	11,600	21,000	63,100	9,400	27,640
<i>Hyalis argentea</i>	b	12,680	21,100		8,420	
<i>Hyalis argentea</i>	c	11,180	21,000		9,820	
<i>Lampranthus multiradiatus</i>	a	14,200	21,900	61,900	7,700	23,700
<i>Lampranthus multiradiatus</i>	b	12,500	20,800		8,300	
<i>Lampranthus multiradiatus</i>	c	11,500	19,200		7,700	
<i>Nassella tenuissima</i>	a	12,100	18,500	55,800	6,400	20,420
<i>Nassella tenuissima</i>	b	11,340	18,000		6,660	
<i>Nassella tenuissima</i>	c	11,940	19,300		7,360	
<i>Sedum acre</i>	a	10,960	22,200	61,200	11,240	29,560
<i>Sedum acre</i>	b	10,020	19,200		9,180	
<i>Sedum acre</i>	c	10,660	19,800		9,140	
<i>Sedum lineare</i>	a	11,300	19,400	55,600	8,100	23,840
<i>Sedum lineare</i>	b	9,300	18,400		9,100	
<i>Sedum lineare</i>	c	11,160	17,800		6,640	
<i>Sedum spectabile</i>	a	12,660	26,600	81,300	13,940	44,900
<i>Sedum spectabile</i>	b	12,460	25,600		13,140	
<i>Sedum spectabile</i>	c	11,280	29,100		17,820	
<i>Zephyranthes candida</i>	a	12,420	19,700	57,900	7,280	21,420
<i>Zephyranthes candida</i>	b	12,200	18,700		6,500	
<i>Zephyranthes candida</i>	c	11,860	19,500		7,640	

TABLA DE DATOS DE PESAJE DE PLANTAS Y RELACIÓN VÁSTAGO RAÍZ

Especie	Rep. Saco	Rep. Planta	Long. Vástago	Peso fresco Vástago	Long. Raíz	Peso fresco Raíz	Peso Total	Relación V/R
<i>Hyalis argentea</i>	Saco 1	Planta a1	55	45	30	90	145	0,50
<i>Hyalis argentea</i>	Saco 1	Planta a2		120	13	400	515	0,30
<i>Hyalis argentea</i>	Saco 1	Planta a3	57	300	22	320	605	0,94
<i>Hyalis argentea</i>	Saco 2	Planta a1	54	125	17	90	320	1,39
<i>Hyalis argentea</i>	Saco 2	Planta a2	61	305	21	265	560	1,15
<i>Hyalis argentea</i>	Saco 2	Planta a3	60	240	28	150	380	1,60
<i>Hyalis argentea</i>	Saco 3	Planta a1	49	165	24	115	245	1,43
<i>Hyalis argentea</i>	Saco 3	Planta a2	47	200	26	215	425	0,93
<i>Hyalis argentea</i>	Saco 3	Planta a3	58	70	22	80	145	0,88
<i>Nassella tenuissima</i>	Saco 1	Planta a1	14	5	11	5	10	1,00
<i>Nassella tenuissima</i>	Saco 1	Planta a2	33	40	53	30	65	1,33
<i>Nassella tenuissima</i>	Saco 1	Planta a3	46	30	20	85	120	0,35
<i>Nassella tenuissima</i>	Saco 2	Planta a1	74	110	18	20	130	5,50
<i>Nassella tenuissima</i>	Saco 2	Planta a2	45	35	18	25	65	1,40
<i>Nassella tenuissima</i>	Saco 2	Planta a3	62	80	15	20	105	4,00
<i>Nassella tenuissima</i>	Saco 3	Planta a1	26	5	14	5	10	1,00
<i>Nassella tenuissima</i>	Saco 3	Planta a2	37	20	14	60	80	0,33
<i>Nassella tenuissima</i>	Saco 3	Planta a3	76	35	13	90	125	0,39
<i>Sedum spectabile</i>	Saco 1	Planta a1	26	90	11	50	135	1,80
<i>Sedum spectabile</i>	Saco 1	Planta a2	44	335	30	145	475	2,31
<i>Sedum spectabile</i>	Saco 1	Planta a3	35	300	21	300	600	1,00
<i>Sedum spectabile</i>	Saco 2	Planta a1	20	40	18	25	70	1,60
<i>Sedum spectabile</i>	Saco 2	Planta a2	22	280	16	245	530	1,14
<i>Sedum spectabile</i>	Saco 2	Planta a3	29	365	29	235	615	1,55
<i>Sedum spectabile</i>	Saco 3	Planta a1	17	215	25	120	335	1,79
<i>Sedum spectabile</i>	Saco 3	Planta a2	42	695	25	355	1045	1,96
<i>Sedum spectabile</i>	Saco 3	Planta a3	18	105	22	115	220	0,91

CURVAS DE TEMPERATURA INTERIOR EN BOX EXPERIMENTALES, TEMPERATURA EXTERIOR Y RADIACIÓN PARA LOS CUATRO CICLOS DE MEDICIÓN



CÁLCULO DE AHORRO ENERGÉTICO A PARTIR DE DATOS OBTENIDOS POR SIMULACIÓN CON ENERGY-PLUS AJUSTADOS CON MEDICIONES EN BOX EXPERIMENTALES

FECHA	HORA	CTSA (J/h)	CTA (J/h)	CV <i>Aptenia cordifolia</i> (J/h)	$\Delta E =$ CTSA - CV	$\Delta E =$ CTA - CV
15/1	0	85585.6	45902.0	28901.9	56683.7	17000.1

1	62683.7	36142.8	21241.0	41442.7	14901.8
2	34917.6	20906.8	8931.6	25985.9	11975.2
3	15733.0	12449.1	3560.1	12172.9	8889.0
4	3687.8	7775.7	257.1	3430.7	7518.6
5	0.0	4362.2	0.0	0.0	4362.2
6	0.0	1232.2	0.0	0.0	1232.2
7	887.8	14120.3	8489.7	-7601.9	5630.6
8	26756.4	48274.4	41939.8	-15183.5	6334.5
9	66706.3	79206.4	73273.4	-6567.1	5932.9
10	105951.1	100696.1	94566.0	11385.2	6130.2
11	149888.7	119423.3	112469.5	37419.2	6953.8
12	194482.9	134200.7	125922.4	68560.4	8278.2
13	236370.9	144492.2	134493.9	101877.0	9998.3
14	275225.1	153089.6	141127.7	134097.5	11962.0
15	312455.8	165331.0	151313.8	161142.1	14017.2
16	342536.7	178431.5	162505.7	180031.0	15925.8
17	355928.2	183205.9	165712.7	190215.5	17493.2
18	336376.3	166328.1	147910.4	188465.9	18417.7
19	277448.2	125732.4	107435.3	170012.9	18297.1
20	202173.2	81481.0	64410.0	137763.3	17071.0
21	128846.1	43423.1	28595.2	100250.8	14827.9
22	80488.6	25796.4	13370.1	67118.6	12426.3
23	49486.6	18219.0	8058.7	41427.9	10160.3
$\Sigma=$	3344616.6	1910222.1	1644486.0	1700130.7	265736.1
16/1 0	24379.7	11221.4	3470.9	20908.8	7750.5
1	4773.6	2756.2	0.0	4773.6	2756.2
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	3557.9	3807.0	-3807.0	-249.2
8	9384.0	50284.7	51361.7	-41977.7	-1076.9
9	75400.9	97379.2	98533.7	-23132.8	-1154.5
10	130711.4	124104.0	124471.8	6239.6	-367.8
11	182161.5	141060.3	139976.2	42185.3	1084.2
12	231461.0	153603.7	150530.7	80930.3	3073.0
13	272900.5	159437.0	154057.1	118843.4	5379.9
14	310899.6	165568.8	157725.0	153174.5	7843.7
15	355572.1	183773.4	173435.2	182136.9	10338.2
16	392766.4	201670.0	188995.8	203770.7	12674.3
17	411643.7	209488.7	194829.7	216814.0	14659.0
18	393015.5	192013.1	176018.9	216996.6	15994.2
19	335108.3	151879.5	135551.8	199556.5	16327.6
20	254717.1	103492.3	87958.4	166758.7	15533.9
21	178004.0	63948.7	50039.1	127965.0	13909.7

	22	136631.8	53214.4	40785.3	95846.5	12429.1
	23	96911.6	38898.0	28427.3	68484.3	10470.7
	$\Sigma =$	3796442.7	2107351.6	1959975.6	1836467.1	147376.0
17/1	0	56859.3	21659.9	13690.5	43168.8	7969.4
	1	28074.7	11854.3	6727.0	21347.7	5127.3
	2	14712.3	10369.0	6529.2	8183.1	3839.8
	3	6433.7	9307.5	6594.3	-160.6	2713.2
	4	1902.8	8615.1	6803.2	-4900.3	1811.9
	5	0.0	2305.0	1591.4	-1591.4	713.6
	6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	7	3753.6	19967.1	20736.4	-16982.8	-769.3
	8	49279.2	68773.8	70034.5	-20755.4	-1260.8
	9	93417.3	98490.7	99548.3	-6131.0	-1057.6
	10	135445.8	118412.9	118597.4	16848.3	-184.5
	11	185235.9	139497.2	138137.4	47098.5	1359.8
	12	233154.9	154569.7	151092.4	82062.4	3477.2
	13	273024.0	161275.2	155289.3	117734.7	5985.9
	14	312213.3	169852.0	161139.8	151073.5	8712.2
	15	359938.8	190977.8	179394.3	180544.5	11583.5
	16	398308.2	209329.8	194963.6	203344.6	14366.2
	17	417855.4	217129.8	200261.9	217593.5	16867.8
	18	402756.0	202044.6	183267.6	219488.3	18777.0
	19	347242.4	162823.1	143121.9	204120.5	19701.3
	20	269547.8	115595.8	96110.4	173437.4	19485.4
	21	190719.0	73146.0	54830.9	135888.0	18315.1
	22	145323.8	59125.2	41863.3	103460.5	17261.9
	23	109009.3	48060.8	32156.9	76852.4	15903.9
	$\Sigma =$	4034207.3	2273182.2	2082482.2	1951725.1	190700.0
18/1	0	79263.5	38517.1	24077.9	55185.5	14439.1
	1	61907.1	35926.6	22605.8	39301.3	13320.8
	2	46165.2	31058.2	19055.6	27109.5	12002.5
	3	29553.6	23267.1	12761.0	16792.7	10506.1
	4	22856.5	22918.8	13169.3	9687.2	9749.4
	5	19438.8	23339.8	14298.8	5139.9	9041.0
	6	14239.3	20571.5	12366.9	1872.4	8204.6
	7	35698.0	43860.1	35188.7	509.4	8671.4
	8	77205.8	81460.2	72506.0	4699.8	8954.2
	9	107810.6	100524.6	91248.5	16562.1	9276.1
	10	138759.9	113982.0	103933.3	34826.6	10048.6
	11	181893.6	133725.6	122357.9	59535.7	11367.7
	12	226384.1	149639.2	136515.7	89868.5	13123.5
	13	261806.0	155320.2	140188.4	121617.5	15131.8
	14	293909.4	160017.9	142699.2	151210.2	17318.6
	15	333008.2	176216.4	156578.0	176430.2	19638.4
	16	361786.6	189158.0	167387.8	194398.8	21770.3
	17	374407.6	194086.9	170547.3	203860.3	23539.6

18	356669.6	179316.7	154680.5	201989.0	24636.2
19	304399.8	144198.7	119474.5	184925.3	24724.2
20	237062.1	105109.7	81295.0	155767.2	23814.8
21	171589.4	71108.2	48967.8	122621.6	22140.4
22	122963.4	50981.5	30712.7	92250.8	20268.9
23	92433.7	43194.8	24488.9	67944.7	18705.8
$\Sigma =$	3951211.8	2287499.8	1917105.6	2034106.2	370394.2

FECHA	HORA	CTSA (J/h)	CTA (J/h)	CV <i>Hyalis argentea</i> (J/h)	$\Delta E =$ CTSA - CV	$\Delta E =$ CTA - CV
27/1	0	33454.4	11788.5	11855.6	21598.9	-67.0
	1	14807.1	6734.2	7199.5	7607.6	-465.3
	2	2313.9	1469.1	2595.1	-281.2	-1126.0
	3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	8	0.0	5471.2	11137.5	-11137.5	-5666.3
	9	13756.4	50968.3	63168.9	-49412.5	-12200.6
	10	78186.0	90961.9	105002.2	-26816.2	-14040.3
	11	129902.4	112081.9	126776.6	3125.8	-14694.6
	12	181601.9	128204.1	142421.5	39180.4	-14217.4
	13	229884.6	139459.3	152249.8	77634.9	-12790.5
	14	277392.2	151373.5	162094.8	115297.4	-10721.3
	15	329781.8	172604.3	181057.2	148724.6	-8452.9
	16	370844.9	190516.4	196719.9	174125.0	-6203.5
	17	391232.2	197520.9	201608.5	189623.6	-4087.6
	18	389922.0	193428.3	195603.9	194318.1	-2175.7
	19	362576.4	174847.5	175408.2	187168.2	-560.7
	20	297370.1	131638.1	130876.0	166494.2	762.2
	21	217458.0	83279.4	81524.3	135933.7	1755.0
	22	146505.2	47455.6	45213.1	101292.1	2242.6
	23	93366.9	27024.7	24902.2	68464.7	2122.4
	$\Sigma =$	3560356.5	1916827.2	2017414.6	1542941.9	-100587.4
28/1	0	64690.4	22649.0	21262.0	43428.4	1387.0
	1	44914.9	20021.5	19769.7	25145.2	251.7
	2	22161.4	11296.6	11832.6	10328.8	-536.0
	3	3747.1	2394.1	3733.5	13.7	-1339.4
	4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	8	0.0	9014.9	17023.1	-17023.1	-8008.1
	9	19540.3	52808.6	65431.4	-45891.2	-12622.9
	10	82888.1	94428.5	108998.5	-26110.4	-14570.0

11	142747.6	124410.0	139879.8	2867.8	-15469.8
12	199311.5	143544.6	158670.4	40641.1	-15125.8
13	244914.7	150841.6	164527.0	80387.7	-13685.4
14	288800.3	159388.6	170976.2	117824.2	-11587.6
15	344105.6	183771.2	193092.0	151013.6	-9320.8
16	391818.1	206985.9	214168.1	177650.0	-7182.2
17	416708.6	216451.0	221550.1	195158.5	-5099.1
18	422854.5	216968.3	220169.2	202685.2	-3201.0
19	397439.9	197914.4	199427.3	198012.6	-1512.9
20	338181.9	158197.2	158302.1	179879.8	-105.0
21	272012.7	119311.7	118385.6	153627.2	926.2
22	212411.5	89110.3	87657.2	124754.3	1453.1
23	167408.8	71796.4	70452.9	96955.9	1343.4
$\Sigma=$	4076658.2	2251304.3	2365308.8	1711349.4	-114004.4
29/1 0	123706.1	53114.9	52309.5	71396.6	805.4
1	81511.1	34176.8	34141.3	47369.8	35.5
2	47159.0	20290.0	21070.4	26088.6	-780.5
3	20063.2	10409.6	11579.0	8484.2	-1169.4
4	2828.7	2348.9	4874.0	-2045.3	-2525.1
5	0.0	0.0	82.8	-82.8	-82.8
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	644.0	3828.9	-3828.9	-3184.9
8	0.0	18991.6	29038.4	-29038.4	-10046.8
9	35588.1	63379.3	77104.0	-41515.9	-13724.6
10	97042.8	105253.5	120977.0	-23934.3	-15723.5
11	154539.3	132601.5	149124.8	5414.5	-16523.3
12	207137.5	148945.9	165065.5	42072.0	-16119.6
13	250497.0	155566.0	170252.7	80244.3	-14686.7
14	295944.6	166490.8	179147.4	116797.2	-12656.6
15	352884.9	192508.6	203025.1	149859.8	-10516.5
16	405102.0	219360.0	227811.6	177290.5	-8451.5
17	433205.0	230285.6	236720.3	196484.7	-6434.7
18	422161.8	215023.6	219420.6	202741.2	-4397.0
19	375354.0	180735.0	183271.7	192082.3	-2536.7
20	312438.7	143285.5	144410.4	168028.4	-1124.9
21	248086.4	108786.9	109005.4	139081.0	-218.6
22	200818.3	89606.1	89572.6	111245.8	33.5
23	166504.6	79034.7	79357.1	87147.4	-322.4
$\Sigma=$	4232573.3	2370838.8	2511190.6	1721382.7	-140351.8
30/1 0	136220.9	68518.1	69610.8	66610.1	-1092.7
1	101298.4	51585.5	53550.2	47748.2	-1964.7
2	66658.5	34275.1	37084.7	29573.9	-2809.6
3	39060.9	22119.6	25705.7	13355.1	-3586.1
4	17092.2	12839.7	16796.8	295.4	-3957.1
5	5817.3	9610.0	14213.0	-8395.6	-4603.0
6	305.1	7968.2	13352.7	-13047.6	-5384.5

7	1419.2	12342.2	20332.7	-18913.5	-7990.5
8	26240.4	44511.5	56559.4	-30319.0	-12047.9
9	74535.6	86917.0	101457.8	-26922.2	-14540.8
10	125478.1	118983.3	135038.9	-9560.9	-16055.6
11	180098.0	144955.5	161555.9	18542.1	-16600.4
12	233696.1	164141.3	180233.3	53462.8	-16092.0
13	275020.3	170014.2	184604.7	90415.6	-14590.6
14	315213.3	177456.3	189971.1	125242.2	-12514.8
15	363222.2	197227.3	207554.2	155667.9	-10327.0
16	395491.5	209612.0	217803.1	177688.3	-8191.1
17	398169.6	204025.0	210143.7	188025.9	-6118.7
18	353257.1	167423.9	171506.6	181750.5	-4082.7
19	283202.0	123197.1	125613.8	157588.2	-2416.7
20	218091.0	91876.3	93344.8	124746.2	-1468.5
21	167641.4	72482.3	73728.3	93913.1	-1246.0
22	136366.0	64921.7	66571.8	69794.3	-1650.1
23	112464.0	59184.2	61676.7	50787.2	-2492.5
$\Sigma =$	4026059.1	2316187.2	2488010.9	1538048.3	-171823.7

PUBLICACIONES CIENTÍFICAS EN REFERENCIA AL TRABAJO DE TESIS

Se presentan a continuación una copia de las publicaciones científicas, con referato, realizadas en el marco de la tesis doctoral. El orden es desde la más actual y segmentadas por estar publicadas en revista o congreso.

DESEMPEÑO TÉRMICO DE CUBIERTAS VERDES EN CIUDADES DE ZONAS ÁRIDAS

THE THERMAL PERFORMANCE OF GREEN ROOFS IN ARID CITIES

JUAN E. FLORES ASIN

Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía -INAHE- CCT Conicet
Mendoza. Mendoza, Argentina
eflores@mendoza-conicet.gob.ar

M. ALICIA CANTÓN

Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía -INAHE- CCT Conicet
Mendoza. Mendoza, Argentina
ecorrea@mendoza-conicet.gob.ar

CLAUDIA F. MARTINEZ

Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía -INAHE- CCT Conicet
Mendoza. Mendoza, Argentina
cmartinez@mendoza-conicet.gob.ar

ERICA N. CORREA

Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía -INAHE- CCT Conicet
Mendoza. Mendoza, Argentina
macanton@mendoza-conicet.gob.ar

RESUMEN

Las cubiertas verdes constituyen una estrategia de enverdecimiento urbano que contribuye a reducir los efectos del calentamiento global, disminuyendo las temperaturas urbanas y los consumos de energía en espacios interiores derivados del acondicionamiento térmico, para alcanzar condiciones de confort en verano. Sin embargo, su implementación en zonas áridas está supeditada al uso de especies vegetales de bajo consumo de agua. Este trabajo evalúa el desempeño térmico de cubiertas verdes con dos especies de distinto hábito de crecimiento y requerimiento hídrico: *Aptenia cordifolia* y *Sedum spectabile*. Con tal fin se desarrollaron mediciones de variables meteorológicas en módulos experimentales, mediante microadquisidores de datos, durante la estación verano 2015. Los resultados obtenidos demuestran que las cubiertas verdes permiten disminuir la temperatura media interior en 2°C, la amplitud térmica en 8°C y la temperatura máxima en 6°C, con diferencias poco significativas entre las especies evaluadas (0.5°C). Estos valores reflejan la eficiencia térmica de dichas cubiertas y la necesidad de ampliar las especies vegetales estudiadas para determinar rangos de beneficio en torno a especies de baja demanda hídrica y alta disponibilidad local.

Palabras clave

cubiertas verdes, desempeño térmico, demanda hídrica, variedades vegetales

ABSTRACT

Green roofs are an urban greening strategy that mitigates the effects of global warming by reducing urban temperatures and energy consumption derived from indoor thermal conditioning used to achieve comfort conditions in summer. However, its implementation in arid cities is dependent upon the use of plant species with low water consumption. This paper assesses the thermal performance of green roofs employing two species with different growth habits and water demand: *Aptenia cordifolia* and *Sedum spectabile*. To this end, meteorological variables were measured in experimental cells by data loggers during the 2015 summer season. The results show that green roofs reduce average interior temperature by 2 °C, thermal amplitude by 8 °C, and maximum temperature by 6 °C, while Differences between the species tested were insignificant (0.5 °C). These values reflect the thermal efficiency of green roofs and the need to increase the number of species studied in order to determine the different benefits from species with low water consumption and high local availability.

Keywords

green roofs, thermal behavior, water demand, plant varieties

Módulos experimentales	Cubierta Tradicional (CT)	Cubierta verde <i>Aptenia cordifolia</i> (CV _{Ac})	Cubierta verde <i>Sedum spectabile</i> (CV _{Se})
			

Figura 1. Diseño experimental. Fuente: Elaboración de los autores.

INTRODUCCIÓN

Una de las estrategias dirigidas a garantizar la sustentabilidad del medio construido y mitigar el fenómeno de isla de calor urbana lo constituye el “enverdecimiento urbano”, es decir, la incorporación de espacios verdes en las ciudades (Clarck y Matheny, 1998).

En las últimas décadas, han surgido nuevas tecnologías -techos y muros verdes- asociadas a la necesidad de aumentar la relación entre la biomasa y las edificaciones en ciudades consolidadas, o sea, en medios urbanos donde la disponibilidad de vacíos es escasa y, en consecuencia, el potencial de incorporación de estructuras verdes tradicionales es limitado.

Esta nueva tendencia en el planeamiento urbano constituye una alternativa viable que impacta tanto a escala urbana como edilicia. En la primera, reduce los efectos del calentamiento global y disminuye las temperaturas del espacio resultante de la articulación de la trama edilicia. En la segunda, esto es, en los espacios interiores, reduce los consumos de energía derivados del acondicionamiento térmico para alcanzar condiciones de confort en la estación cálida (Alexandri y Jones, 2008).

A nivel internacional, numerosos autores han descripto y cuantificado los beneficios de los techos verdes asociados a la determinación de las temperaturas superficiales de las cubiertas verdes, la temperatura del aire en espacios interiores y espacios urbanos mediatos, con el objeto de determinar el impacto de los sistemas conformados por distintas especies vegetales en la demanda de energía para refrigeración (La Roche, 2009). Dichas investigaciones muestran que las cubiertas verdes pueden disminuir entre 60 y 90% el flujo de calor a través del techo y entre 0.8 y 3°C la temperatura interior (Rosenzweig *et al.*, 2009; Qiu *et al.*, 2013). El alcance y la extensión de estos beneficios varía en función del clima, la tecnología de la envolvente edilicia y las características de la cubierta verde que condicionan el mecanismo de enfriamiento preponderante (Cameron, Taylor y Emmett, 2014).

En Argentina, el interés por estas tecnologías se ha incrementado a partir del año 2013 con la aprobación de la Ley N°4.428. Esta ley tiene por objeto la implementación de “Techos o Terrazas Verdes” en el ámbito de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Desde entonces han surgido, además de programas, documentos y aplicación en obras emblemáticas, empresas generadoras de esta tecnología con aplicación en obra y uso de materiales utilizados en otros países. Sin embargo, su implementación requiere evaluar el desempeño térmico del sistema en relación a las distintas zonas climáticas que caracterizan a la región.

En el caso particular de Mendoza, el ambiente físico está caracterizado por la aridez, de manera que el recurso hídrico es escaso -Índice de aridez=1.7; Precipitación anual=200mm (González Loyarte, Menenti y Diblasi, 2009)-. A nivel urbanístico, la estructura de la ciudad responde al modelo reconocido internacionalmente como *ciudad oasis*, con una fuerte presencia de verde dispuesto a lo largo de calles, parques, plazas y patios (Bórmida, 1986). El crecimiento sostenido de la ciudad en los últimos años no ha sido acompañado de un proceso de densificación de los espacios verdes, por lo que no se dispone, en la actualidad, de vacíos urbanos para la inserción en la trama de estructuras verdes tradicionales.

En las áreas de mayor demanda de espacios verdes -alta densidad edilicia-, la ciudad cuenta con un elevado porcentaje (60%) de cubiertas planas potencialmente aptas para la implementación de tecnologías verdes (Flores Asin, Martínez y Cantón, 2013). No obstante, su incorporación masiva requiere del diseño y evaluación de sistemas de naturación extensivo bajo las condicionantes que las ciudades de zonas áridas imponen, en particular la restricción hídrica. Esto implica evaluar la eficacia y eficiencia de los sistemas asociados a vegetación de bajo consumo de un recurso escaso pero vital para garantizar la permanencia en el tiempo de las áreas verdes.

Este trabajo evalúa el desempeño térmico de cubiertas verdes con especies que presentan distinta morfología y demanda hídrica, con el propósito de identificar paquetes biológicos factibles de ser empleados como estrategia de acondicionamiento natural de espacios interiores en ciudades de zonas áridas.

Tabla 1. Características de las especies vegetales evaluadas. Fuente: Elaboración de los autores.

Especie	<i>Apteniacordifolia</i>	<i>Sedumspectabile</i>
Característica		
Poder tapizante (%)	73	68
Consumo hídrico (litros.m ² /año)	268	291
Hábito de crecimiento	Rastrero	Erguida

METODOLOGÍA

DISEÑO EXPERIMENTAL.

El diseño experimental responde a la metodología propuesta por La Roche (2009) y tiene por objetivo analizar en forma comparativa la influencia de cubiertas verdes (CV), respecto a cubiertas tradicionales (CT), en el comportamiento térmico de espacios interiores. Para ello, se montaron tres módulos de ensayo en el área experimental del CCT CONICET Mendoza (32°53'52.83"S, 68°52'31.30"O) que permitieran comparar sistemas verdes con distintos paquetes biológicos, respecto a una cubierta tradicional (Figura 1).

Los módulos experimentales conforman volúmenes ciegos de 1m³, de carácter liviano y aislado al exterior. Tecnológicamente, muros y pisos están compuestos por tres capas: placa de cemento en la cara interior (espesor: 10mm), aislación térmica de poliestireno expandido de baja densidad (espesor: 50mm) y placa de fenólico en la cara exterior (espesor: 18mm), acabado esmalte sintético color blanco. La cubierta es de hormigón armado (espesor: 150mm; peso específico 2400Kg/m³); dosificación en volumen: 1-3-3 (cemento, árido grueso y fino), aislada hidráulicamente con membrana Sika® Sarnafil F 610-12 Felt. El empleo de esta clase de cubierta tiene como finalidad evaluar el tipo constructivo comúnmente empleado en la resolución de techos en el parque edilicio de Mendoza.

La tecnología verde está definida por dos capas: una material (manto drenante Sika® GR Aquadrain Extensivo y sistema de riego por goteo subsuperficial) y una biológica. Ésta se compone de sacos de geotextil (3) contenedores del sustrato (arena, orujo agotado y turba negra en iguales proporciones; espesor: 150mm) y especies vegetales.

En este trabajo se evalúa dos especies de disponibilidad local y alta tasa de reproducción agámica, que fueron elegidas de un conjunto de 14 especies preseleccionadas: *Aptenia cordifolia* (L. f.) Schwant, "Baby rose", y *Sedum*

spectabile (Boreau) H. Ohba, "Sedum otoño" (Tabla 1). El análisis comparativo de ambas especies tiene el objetivo de analizar diferentes consumos hídricos y hábitos de crecimiento, con semejante poder tapizante y su incidencia en el comportamiento térmico de las tecnologías verdes y de los espacios interiores conexos.

MÉTODO DE MEDICIÓN

El comportamiento térmico de las tecnologías verdes en sí mismas y de los espacios interiores se evaluó a partir del registro de variables meteorológicas (temperatura de aire, temperatura y contenido de agua del sustrato, y temperatura superficial de la losa), en la estación verano durante un periodo de 24 días. Los datos se registraron cada 15 minutos bajo la siguiente configuración: cinco sensores por módulos con cubierta verde, tres en el módulos testigo y uno de referencia en el espacio abierto.

La ubicación de los sensores se definió en función de ensayos previos dirigidos a determinar la posición más representativa respecto a la variable a medir y evitar la influencia de factores externos. Los sensores localizados en los módulos de ensayo se distribuyeron del siguiente modo: uno en el espacio interior (T_i), dos en la losa de hormigón en la cara superior (T_{SSL}) e inferior (T_{SIL}); y dos en el sustrato (T_s y C_{AS}) para los módulos con cubierta verde (Figura 2).

Los sensores del tipo Onset® HOBOTM Soil Moisture EC5 S-SMC-M005 se calibraron en laboratorio de acuerdo a las recomendaciones del fabricante, encontrándose en el rango de funcionalidad normal (aire: -0.193 a -0.139 m³/m³, agua: +0.521 a +0.557 m³/m³). Los sensores del tipo Onset® HOBOTM 12-bit Temp Sensor S-TMB-M002 fueron calibrados con salto de escalón térmico en laboratorio. El comportamiento fue uniforme y mostraron igual sensibilidad al enfriamiento y al calentamiento. Los desvíos se encontraron en un rango de ± 3.00 % respecto de la media general (rango de temperaturas del fabricante: -40 a 75°C).

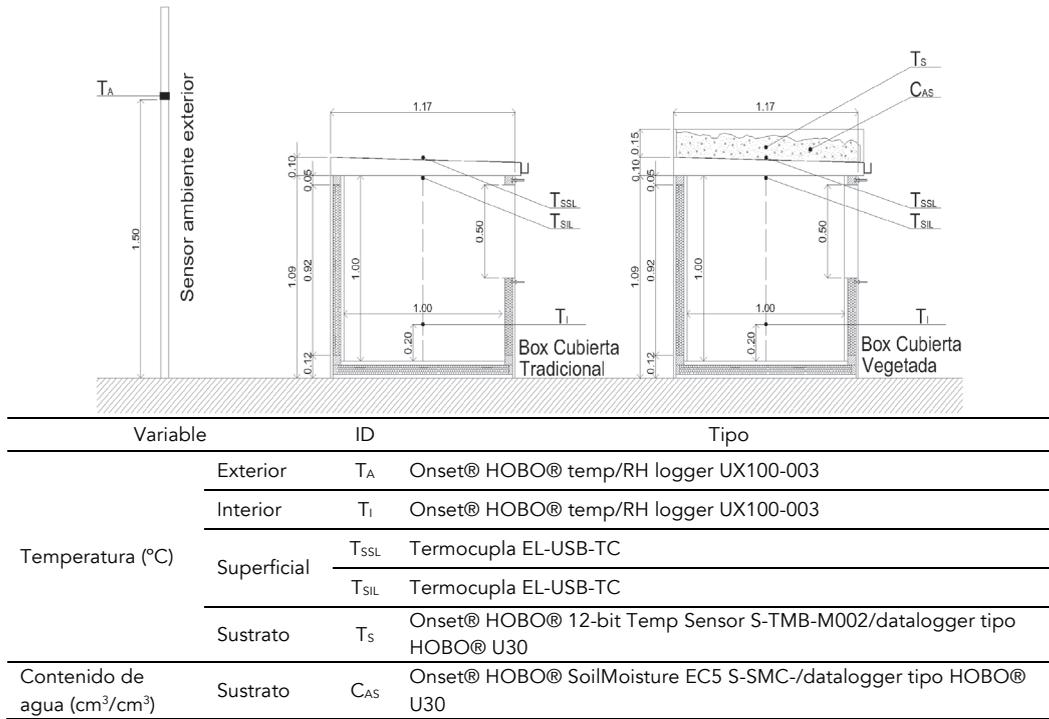


Figura 2. Método de medición e instrumental utilizado. Fuente: Elaboración de los autores.

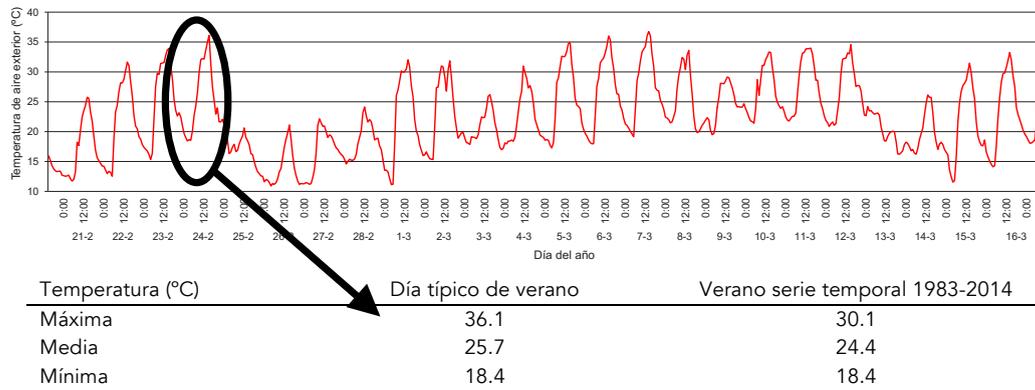


Figura 3. Periodo medido. Datos del día típico y de la serie temporal 1983-2014. Fuente: Elaboración de los autores.

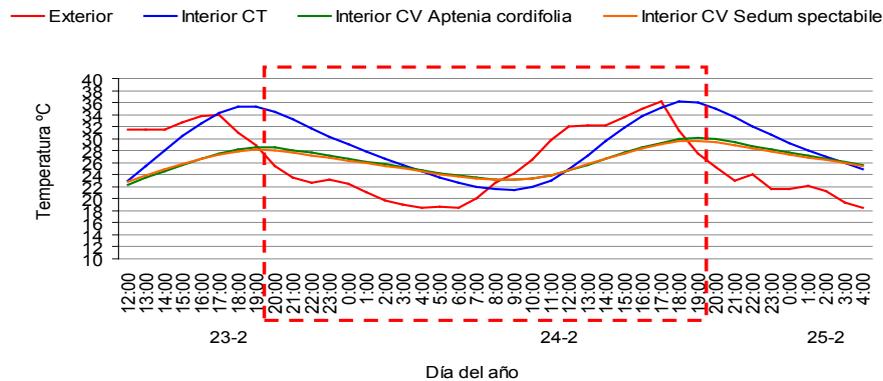


Figura 4. Comportamiento térmico del espacio interior. Fuente: Elaboración de los autores.

En el ambiente exterior se midió radiación solar total (W/m^2) con un piranómetro Star Pyranometer Mod3040-A Weather Tronic velocidad de viento (km/h) con un anemómetro Micro Response Anemometer Mod 2030 Weather Tronic. El almacenamiento de los datos se realizó en una memoria flash del tipo Secure Digital (SD).

RESULTADOS

Los datos obtenidos de las mediciones fueron promediados en forma horaria. La curva de temperatura exterior (Figura 3), en el periodo monitoreado, muestra un comportamiento inestable con diferencias en las temperaturas máximas y mínimas del orden de los $11^\circ C$ (máximas 20.6 a $36.8^\circ C$ y mínimas $11.2^\circ C$ a $22.6^\circ C$).

A efectos de tomar como unidad de estudio un día típico de verano, se compararon los datos medidos con los datos medios históricos para la serie temporal 1983-2014 correspondientes a la estación meteorológica CCT CONICET – Mendoza.

La contrastación de datos permitió seleccionar el día 23 de febrero con una diferencia en la temperatura media de $1.3^\circ C$ respecto a los datos medios históricos. Para dicho día se consideró el rango horario de 24 horas, comenzando a las 20:00h. El día elegido presenta condiciones de asoleamiento en días previos (Figura 3). Figura 3. Periodo medido. Datos del día típico y de la serie temporal 1983-2014. Fuente: Elaboración de los autores.

Los resultados se presentan en función de evaluar comparativamente las distintas variables para los módulos experimentales planteados mediante análisis térmico y análisis de correlación.

COMPORTAMIENTO TÉRMICO.

Los resultados obtenidos se analizan en forma comparativa para los tres módulos experimentales -CT, CV_{Ac} y CV_{Se} - en torno a la influencia de la cubierta de los mismos en la temperatura del aire del espacio interior, temperatura superficial de la losa, y temperatura y contenido de agua del sustrato.

ESPACIO INTERIOR.

Temperatura del aire.

La Figura 4 muestra el comportamiento de la temperatura exterior y la del aire interior en cada uno de los módulos de ensayo. Se observa un retardo entre las temperaturas máximas y mínimas en el interior de cada uno de las cubiertas verdes respecto a la temperatura exterior equivalente a 3 horas durante el calentamiento y a 5 horas durante el enfriamiento, lo cual evidencia el efecto de la tecnología verde en la temperatura interior.

Es notable la diferencia de la amplitud térmica entre el exterior y el interior de cada uno de los módulos. Su valor es superior a $3^\circ C$ en CT y alcanza una diferencia de 10 a $11^\circ C$ en los módulos CV_{Ac} y CV_{Se} (Tabla 2).

Al considerar la magnitud del retardo y el valor de la temperatura interior entre los picos y valles de las curvas, se presentan diferencias que manifiestan el efecto particular de cada cubierta verde respecto de la temperatura interior del CT. Mientras la amplitud térmica de la temperatura interior en los módulos con cubierta verde está atenuada -6 a $7^\circ C$ -, se aprecia una diferencia importante respecto a la amplitud térmica de la temperatura interior del TT $-14^\circ C$ - y respecto a la del ambiente $-17^\circ C$ - (Tabla 2).

Tabla 2. Temperatura y amplitud térmica. Fuente: Elaboración de los autores.

Temperatura ($^\circ C$)	Exterior	Interior		
		CT	CV_{Ac}	CV_{Se}
Mínima	18.4	21.5	23.2	23.1
Media	25.7	28.1	26.2	26.0
Máxima	36.1	36.1	30.1	29.7
Amplitud térmica	17.7	14.6	6.9	6.6

La temperatura media interior del módulos testigo es $2.5^\circ C$ superior a la media exterior y las temperaturas medias de los módulos CV_{Ac} y CV_{Se} son semejantes entre sí y a la exterior, pero inferiores respecto al testigo con cubierta tradicional, en un rango de 1.9 - $2.1^\circ C$ (Tabla 2).

La temperatura máxima en el interior de CT es igual a la exterior. Al comparar las temperaturas máximas interiores entre módulos con cubierta verde respecto al módulo testigo con cubierta tradicional, se observa que CV_{Ac} se encuentra $6.0^\circ C$ por debajo de CT y CV_{Se} $6.5^\circ C$ (Tabla 2).

Al comparar los módulos CV_{Ac} y CV_{Se} , se advierte que las mayores temperaturas se dan en CV_{Ac} , aunque las diferencias entre valores medios, mínimos, máximos y amplitud térmica, son despreciables y del orden de $0.2^\circ C$, $0.1^\circ C$, $0.5^\circ C$ y $0.4^\circ C$, respectivamente (Tabla 2).

LOSA

Temperatura superficial.

La curva de la temperatura superficial en la cara exterior de la losa, en CT, muestra un comportamiento similar a la temperatura exterior con un desfase horario de una hora, tanto en el periodo de enfriamiento (desde las 20:00 h. hasta las 07:00 h.) como en el periodo de calentamiento (desde las 07:00 h. hasta las 20:00 h.). Alcanza una temperatura máxima de $35.3^\circ C$ y una mínima de $18.6^\circ C$. La cara inferior presenta mayores temperaturas respecto a la cara superior, alcanzando un valor máximo de $39.3^\circ C$ y un mínimo de $21.9^\circ C$. Las mayores temperaturas inferiores resultan del efecto combinado de la ganancia térmica y la inercia de la envolvente -paramentos verticales y horizontales- (Figura 5).

Las temperaturas encaras superior e inferior de la losa en los módulos con cubiertas verdes son significativamente menores a los alcanzados en CT, semejantes entre sí y homogéneas. Alcanzan temperaturas que oscilan entre $22^\circ C$

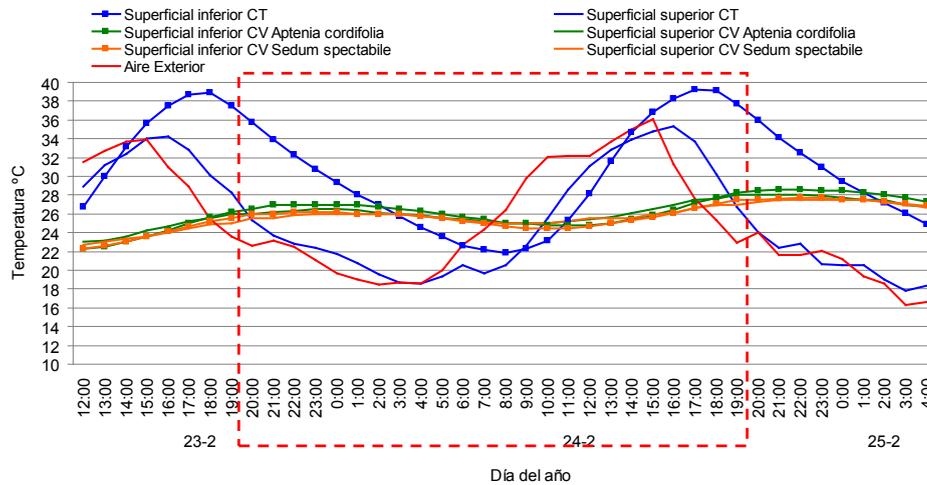


Figura 5. Temperatura superficial de la losa. Fuente: Elaboración de los autores.

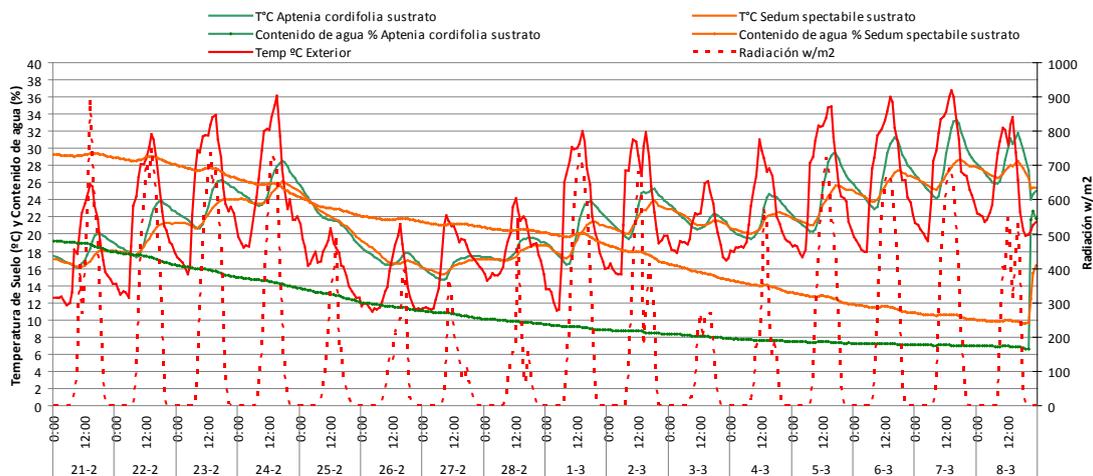


Figura 6. Temperatura y contenido de agua del sustrato: período entre riegos y día típico. Fuente: Elaboración de los autores.

y 29°C (amplitud térmica 7°C). El comportamiento térmico en CV_{Ac} presenta temperaturas máximas superficiales levemente mayores en la cara superior de la losa (26.5°C) respecto al CV_{Se} (26.0°C) y semejantes en las temperaturas mínimas (25.0°C). Esta leve diferencia en las temperaturas máximas se debe a las características propias de las especies en estudio (Figura 5).

Las temperaturas superficiales de la cara inferior de la losa son mayores a las de la superior en el periodo de enfriamiento (de 21:00 h. a 12:00 h.) y menores en el periodo de calentamiento (de 12:00 h. a 21:00 h.). Al igual que en el módulos CT, este comportamiento se debe al efecto de la ganancia térmica y la inercia de la losa de hormigón (Figura 5).

SUSTRATO

Temperatura y contenido de agua (Figura 6).

El contenido de agua del sustrato ha sido analizado para un periodo de 16 días con condición estable, es decir, un lapso entre dos riegos sucesivos sin aporte de precipitaciones. Este criterio se sustenta en que la variable cumple un ciclo entre dos riegos debido a las propiedades físicas del sustrato-textura y estructura-, cuyo comportamiento está asociado a la variación diaria de la humedad en función de aportes de agua, variables meteorológicas y la influencia del sistema radical de las plantas.

CV_{Ac} presentó un menor rango de variabilidad de contenido de agua del sustrato, entre 6.9 y 19.2% -amplitud 12.3%-, en cambio, CV_{Se} exhibió un rango de 10.0 a 29.3% -amplitud 19.3%-.

Tabla 3. Matriz de correlaciones canónicas para CVAc. Fuente: Elaboración de los autores.

		Temperatura (°C)					Radiación (W/m ²)	Velocidad viento (Km/h)
		Sustrato	Superficial superior	Superficial inferior	Interior	Exterior		
Temperatura (°C)	Sustrato	1.00	0.93	0.89	0.96	0.67	0.14	0.15
	Superficial superior	0.93	1.00	0.99	0.94	0.43	-0.11	0.01
	Superficial inferior	0.89	0.99	1.00	0.94	0.34	-0.21	-0.06
	Interior	0.96	0.94	0.94	1.00	0.54	-0.06	0.07
	Exterior	0.67	0.43	0.34	0.54	1.00	0.72	0.51
Radiación W/m ²		0.14	-0.11	-0.21	-0.06	0.72	1.00	0.65
Velocidad viento Km/h		0.15	0.01	-0.06	0.07	0.51	0.65	1.00

Tabla 4. Matriz de correlaciones canónicas para CVSe. Fuente: Elaboración de los autores.

		Temperatura (°C)					Radiación (W/m ²)	Velocidad viento (Km/h)
		Sustrato	Superficial superior	Superficial inferior	Interior	Exterior		
Temperatura (°C)	Sustrato	1.00	0.99	0.98	0.95	0.53	0.00	0.08
	Superficial superior	0.99	1.00	1.00	0.92	0.41	-0.11	0.01
	Superficial inferior	0.98	1.00	1.00	0.94	0.38	-0.16	-0.02
	Interior	0.95	0.92	0.94	1.00	0.57	-0.02	0.10
	Exterior	0.53	0.41	0.38	0.57	1.00	0.72	0.51
Radiación W/m ²		0.00	-0.11	-0.16	-0.02	0.72	1.00	0.65
Velocidad viento Km/h		0.08	0.01	-0.02	0.10	0.51	0.65	1.00

Tabla 5. Matriz de correlaciones canónicas para CT. Fuente: Elaboración de los autores.

		Temperatura (°C)				Radiación (W/m ²)	Velocidad viento (Km/h)
		Superficial superior	Superficial inferior	Interior	Exterior		
Temperatura (°C)	Superficial superior	1.00	0.08	0.06	0.08	0.04	-0.06
	Superficial inferior	0.08	1.00	0.97	0.75	0.26	0.28
	Interior	0.06	0.97	1.00	0.61	0.04	0.14
	Exterior	0.08	0.75	0.61	1.00	0.72	0.51
Radiación W/m ²		0.04	0.26	0.04	0.72	1.00	0.65
Velocidad viento Km/h		-0.06	0.28	0.14	0.51	0.65	1.00

Las curvas que representan el contenido de agua del sustrato muestran un comportamiento diferenciado respecto a la cantidad volumétrica del mismo, y semejante respecto a la pendiente que representa la disminución del contenido hídrico en el suelo entre los días 21 y 28 de febrero. La velocidad de disminución de contenido de agua para ambas especies es constante hasta el 1 de marzo, alcanzando valores de 10% para CV_{Ac} y 21% para CV_{Se} . Los rangos en los que varía el contenido hídrico es de 9.7% para CV_{Ac} ($\Delta H_{CV_{Ac}}$) y de 9,1% para CV_{Se} ($\Delta H_{CV_{Se}}$). A partir de estos valores, el comportamiento de las especies se diferencia de la siguiente forma: CV_{Ac} disminuye la velocidad de descenso de la humedad, mientras que CV_{Se} la aumenta, poniendo de manifiesto las distintas capacidades de absorción de las especies en estudio ($\Delta H_{CV_{Ac}}=1.9\%$; $\Delta H_{CV_{Se}}=8.8\%$).

En el periodo comprendido entre riegos, las curvas que reflejan las temperaturas del sustrato muestran un comportamiento amortiguado respecto de la temperatura exterior. La temperatura máxima y la amplitud térmica del sustrato del CV_{Se} son menores (máx. media 23.9°C, amplitud media 3.1°C) respecto al CV_{Ac} (máx. media 26.1°C, amplitud media 5.9°C). Las temperaturas mínimas medias alcanzadas son similares (20.9°C CV_{Ac} , 20.2°C CV_{Se}).

Para el día típico, la temperatura exterior oscila en un rango de 25.7°C, con un máximo de 36.1°C y un mínimo de 18.4°C. La temperatura de sustrato presenta una amplitud térmica de 5.2°C para CV_{Ac} (máx. 28.5°C y mín 23.3°C) y de 2.6°C para CV_{Se} (máx. 26.1°C y mín. 23.5°C). La máxima de la temperatura exterior se presenta en forma desfasada con los valores máximos de radiación solar. Sin embargo, la temperatura máxima del sustrato coincide con la máxima de la temperatura exterior. Las magnitudes se encuentran atenuadas 10.0°C para CV_{Se} y 7.6°C para CV_{Ac} . Estos comportamientos evidencian la capacidad del paquete biológico de regular la temperatura exterior.

La temperatura del sustrato aumenta a medida que la cantidad de agua disminuye, lo que demuestra la incidencia del contenido hídrico sobre la inercia térmica del sustrato.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS.

Los datos obtenidos se analizaron con InfoStat, un software para análisis estadístico de aplicación general desarrollado bajo la plataforma Windows (Universidad Nacional de Córdoba, 2008). Se realizó una matriz de correlaciones canónicas para análisis multivariado, con el objeto de evaluar la correlación entre la temperatura interior y las variables independientes que influyen sobre la magnitud de la misma (Tablas 3, 4 y 5).

La temperatura interior en los módulos CV_{Ac} y CV_{Se} depende de la temperatura del sustrato, alcanzando valores de correlación superiores a 0.9 en ambas especies. La temperatura del sustrato (paquete biológico) se correlaciona con la temperatura exterior (0.67 CV_{Ac} , 0.53 CV_{Se}) y ésta depende de la radiación solar (0.72) y de la velocidad de viento (0.51). Si bien radiación y velocidad de viento se correlacionan estadísticamente con la temperatura exterior, no lo hacen directamente con ninguno de los estratos que forman parte del camino que debe atravesar el flujo de calor hacia el interior de los módulos experimentales. Por lo tanto, el análisis estadístico indicaría que la influencia de la temperatura exterior sobre la interior es indirecta.

Las relaciones entre variables descriptas previamente muestran que la temperatura interior depende del paquete biológico y éste de la temperatura exterior, por tanto, la respuesta térmica de las tecnologías verdes en espacios interiores depende de la condición climática del sitio de emplazamiento.

El comportamiento térmico en el interior de los módulos con cubiertas verdes se correlaciona con la temperatura superficial de la losa de hormigón en ambas caras -con valores de correlación superiores a 0.9-. Esto parecería indicar que la tecnología de la cubierta tiene influencia sobre la temperatura interior en espacios que han incorporado tecnologías verdes.

La temperatura interior del CT muestra mayor dependencia de la temperatura exterior -0.61-, que la de los módulos con cubierta verde -0.54 para CV_{Ac} y 0.57 para CV_{Se} -.

CONCLUSIONES.

De los resultados obtenidos mediante los ensayos experimentales se puede concluir que en un día típico de verano en la ciudad de Mendoza, el uso de tecnologías verdes sobre techos planos permite disminuir la amplitud térmica interior alrededor de 8°C y la temperatura máxima, 6°C. El mismo efecto se observa en la temperatura media interior, que decae al menos 2°C con el uso de cubiertas verdes, respecto a un techo tradicional sin vegetar.

La reducción de la temperatura en espacios interiores contribuye a moderar los consumos de energía en el ambiente construido. Estudios previos muestran que en viviendas con tecnologías de envolvente másica, disminuciones de temperatura del orden de 1°C aminoran en un 27% los consumos de energía derivados de la necesidad de enfriamiento para alcanzar condiciones de confort. Esto implica que pequeñas diferencias de temperatura generan un alto impacto en la demanda energética para el acondicionamiento térmico de espacios interiores (Cantón y Fernández, 2010).

Los comportamientos térmicos entre los módulos de ensayo con diferentes especies vegetales -*Sedum spectabile*, *Aptenia cordifolia*- muestran diferencias poco significativas. Las temperaturas máximas alcanzadas en el interior de los módulos difieren en 0.5°C. Ello significa que es necesario ampliar el universo de especies en estudio para identificar mayores rangos de eficiencia. Además, el criterio de selección de especies en zonas áridas debe asociarse principalmente a la demanda hídrica y la disponibilidad local. De las especies estudiadas, *Aptenia cordifolia* muestra ser una especie compatible con esta condición (*Aptenia* sp. 268 litros.m²/año; *Sedum* sp. 291 litros.m²/año).

La temperatura superficial en la cara externa de las losas en los módulos con cubiertas verdes exhibe condiciones de estabilidad, siendo su amplitud térmica 13°C menor respecto al módulo testigo. La temperatura máxima superficial es del orden de 34°C en el módulo testigo y de 26°C en los módulos con cubiertas verdes. Desde el punto de vista tecnológico, la reducción de la amplitud térmica representa un beneficio asociado al aumento de la vida útil de la aislación, debido a su exposición a condiciones térmicas más favorables (Jaffal, Ouldboukhitine y Belarbi, 2012).

Los resultados alcanzados respecto a la temperatura y contenido de agua del sustrato evidencian que a mayor contenido de agua es mayor la estabilidad térmica. Este comportamiento se observa en la cubierta vegetada con *Sedum spectabile* donde el mayor calor

específico del agua respecto del aire, provoca que la ganancia térmica modifique en menor medida la temperatura del sustrato. El uso de especies que conservan mayor contenido de agua en el sustrato permite mayor inercia térmica en el mismo, logrando un beneficio con respecto al aislamiento térmico hacia el interior. La especie *Sedum spectabile* demostró un comportamiento más dinámico respecto a la tasa de absorción de agua. Las desiguales tasas de absorción se deben a diversos factores: características fisiológicas diferenciales según especies, distinta estructura del sustrato debido al sistema radical de cada especie y disímiles requerimientos hídricos.

El paquete biológico en un día representativo de verano se comporta como un aislante, disminuyendo las temperaturas máximas exteriores a nivel de sustrato en más de 7°C y la amplitud térmica en más de 12°C con respecto a la exterior.

Los resultados del tratamiento estadístico de los datos indican que el comportamiento térmico de espacios interiores con cubiertas verdes está correlacionado con la temperatura superficial de la losa en la cara superior e inferior, y éstas, a su vez, con la temperatura del paquete biológico. Mientras que dicha temperatura está asociada al contenido hídrico del sustrato y a la temperatura exterior. Esto demuestra que intervenir sobre el diseño y los componentes de la cubierta verde permite desarrollar diferentes estrategias para regular el desempeño térmico de los espacios interiores en función del clima en el cual se inserta la tecnología.

Un análisis crítico de la cubierta verde revela que:

-respecto al sustrato y atendiendo a la sustentabilidad del sistema, su viabilidad está asociada al bajo peso específico (que permita controlar la sobrecarga en la estructura edilicia), a la disponibilidad local y al bajo costo, en la medida en que se busca propiciar un sistema posible de ser implementado en forma masiva.

-respecto a las especies, si bien aquellas empleadas en cubiertas verdes a nivel internacional pertenecen en su mayoría al género *Sedum*, bajo condiciones de clima árido, la tendencia de uso debiera orientarse a especies nativas o adaptadas para asegurar la cobertura vegetal (Klein y Coffman, 2015). En este sentido, es pertinente atender al uso de especies vegetales adaptadas al rigor climático local y de alta disponibilidad regional, como es el caso de *Aptenia cordifolia*.

AGRADECIMIENTOS.

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICET) y a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCYT) la financiación recibida para el desarrollo de esta investigación. Así también a las Empresas SIKA ARGENTINA y SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS S.A. por sus contribuciones al desarrollo de ensayos experimentales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEXANDRI, Eleftheria y JONES, Phil. Temperature decreases in as urban canyon due to green walls and green roof in diverse climates. *Building and Environment-Elsevier*, 2008, n° 43, pp.480-493.

BÓRMIDA, Eliana. Mendoza, modelo de ciudad oasis. *Revista SUMMA*, 1986, n° 226, pp. 68-72.

CAMERON, Ross W. F.; TAYLOR, Jane E. T. y EMMETT, Martin R. What's 'cool' in the world of green façades? How plant choice influences the cooling properties of green walls. *Building and Environment*, 2014, n° 73, pp. 198-207.

CANTÓN, María Alicia y FERNÁNDEZ, Jorge. Efecto de los toldos en las condiciones térmicas del espacio abierto y su influencia en los interiores en zonas áridas. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 2010, n° 26, pp. 1-8.

CLARCK, James R. y MATHENY, Nelda P. A model of Urban Forest Sustainability: Application to Cities in the United States. *Journal of Arboriculture*, 1998, vol. 24, n° 2, pp. 112-120.

FLORES ASIN, Juan Emiliano; MARTÍNEZ, Claudia Fernanda y CANTÓN, María Alicia. 2013. Tecnologías verdes. Potencial de aplicación en el área metropolitana de MENDOZA (AMM). En: *Acta de la XXXVI Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente (22 al 25 de octubre de 2013)*. Tucumán, Argentina, 2013, pp.05.115-05.120.

GONZÁLEZ LOYARTE, María Margarita; MENENTI, Massimo y DIBLASI, Ángela M. Mapa bioclimático para las Travesías de Mendoza (Argentina) basado en la fenología foliar. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias – Universidad Nacional de Cuyo*, 2009, n° 41, pp. 105-122.

JAFFAL, Issa; OULDBOUKHITINE, Salah-Eddine y BELARBI, Rafik. A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. *Renewable Energy-Elsevier*, 2012, n° 43, pp. 157-164.

KLEIN, Petra M. y COFFMAN, Reid. Establishment and performance of an experimental green roof under extreme climatic conditions. *Science of the Total Environment-Elsevier*, 2015, n° 512-213, pp. 82-93.

LA ROCHE, Pablo. Low Cost Green Roofs for Cooling: Experimental series in a hot and dry climate. En: *PLEA2009 (22-24 June 2009) - 26th Conference on Passive and Low Energy Architecture* [en línea]. Quebec City, Canada, 2009. [Consultado 10 diciembre 2016]. Disponible en: <http://www.plea2009.arc.ulaval.ca/Papers/2.STRATEGIES/2.2%20Heating%20and%20Cooling/ORAL/2-2-17-PLEA2009Quebec.pdf>

QIU, Guo-yu; LI, Hong-yong; ZHANG, Qing-tao; CHEN, Wan; LIANG, Xiao-jian y LI, Xiang-ze. Effects of Evapotranspiration on Mitigation of Urban Temperature by Vegetation and Urban Agriculture. *Journal of Integrative Agriculture*, 2013, n° 12, pp. 1307-1315.

ROSENZWEIG, Cynthia; SOLECKI, William D.; PARSHALL, Lily; LYNN, Barry; COX, Jennifer; GOLDBERG, Richard; HODGES, Sara; GAFFIN, Stuart; SLOSBERG, Ronald B.; SAVIO, Peter; DUNSTAN, Franky WATSON, Mark. Mitigating New York city's heat island. Integrating stakeholder perspectives and scientific evaluation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, vol. 9, n° 90, pp. 1297-1312.

Universidad Nacional de Córdoba (UNC). *Programa Estadístico InfoStat* [en línea]. 2008. [Consultado 2 junio 2015]. Disponible en: <http://www.infostat.com.ar>.

Acta del  I Encuentro Nacional
sobre **Ciudad, Arquitectura y
Construcción Sustentable**

23 al 27
mayo
2016 Facultad de Arquitectura
y Urbanismo UNLP
La Plata | Argentina

ORGANIZAN



facultad de
arquitectura
y urbanismo



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA

capbauno 
Colegio de Arquitectos
Provincia de Buenos Aires
Distrito Uno



PATROCINAN



COMISIÓN DE
INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS



Acta del I Encuentro Nacional sobre Ciudad, Arquitectura y Construcción Sustentable



Laboratorio de Arquitectura y Hábitat Sustentable
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Universidad Nacional de La Plata
2016

Acta del I Encuentro Nacional sobre Ciudad, Arquitectura y Construcción Sustentable

Compiladores

Jorge D. Czajkowski Analía F. Gómez

Coordinador

Mauro G. García Santa Cruz

Editores

Brenda T. Czajkowski David E. Basualdo
María de la Paz Diulio Robert D. Nieto Jimenez
Gabriela Reus Netto Mauro G. García Santa Cruz

Laboratorio de Arquitectura y Hábitat Sustentable
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Universidad Nacional de La Plata
2016

Acta del I Encuentro Nacional sobre Ciudad, Arquitectura y Construcción Sustentable / Jorge D. Czajkowski ... [et.al.]; compilado por Jorge D. Czajkowski y Analía F. Gómez; coordinación a cargo de Mauro G. García Santa Cruz. - 1a ed. - La Plata: Universidad Nacional de la Plata. Facultad de Arquitectura y Urbanismo, 2016.

650 p. 21,0 x 29,7 cm.

ISBN en trámite

1. Ciudad. 2. Arquitectura. 3. Construcción Sustentable. I. Czajkowski, Jorge D. II. Czajkowski, Jorge D., comp. III. Gómez, Analía F., comp. IV. García Santa Cruz, Mauro G., coord.

CDD

Fecha de catalogación: 20/05/2016

© de los textos y las ilustraciones: sus autores.

Las opiniones expresadas pertenecen a los autores de los textos.

Editado por LAYHS FAU UNLP

Calle 47 Nro 162 | B1900GGD | La Plata, Buenos Aires, ARGENTINA

Tel. +54 221 4236587/90 Int. 255 | layhs@fau.unlp.edu.ar

Diseño de portada: Brenda T. Czajkowski

Diseño interior y diagramación: Mauro G. García Santa Cruz, Brenda T. Czajkowski, María de la Paz Diulio

1ª edición, 2016.

Hecho el depósito que marca la ley 11.723

Libro de edición Argentina.

ISBN (versión impresa)

(versión digital)

“No se permite la reproducción parcial o total, el almacenamiento, el alquiler, la transmisión o la transformación de este libro, en cualquier forma o por cualquier medio, sea electrónico o mecánico, mediante fotocopias, digitalización u otros métodos, sin el permiso previo y escrito del editor. Su infracción está penada por las leyes 11723 y 25446.”

Índice

Índice.....	7
Prólogo	11
Agradecimientos	13
Presentación	14
Comité Organizador	16
Comité Científico	16
01. Sustentabilidad Urbana	19
Transformación sostenible del Espacio Público en barrios del Gran Santiago. El caso del Barrio San Gregorio, Santiago de Chile	21
La territorialidad del agua. Aportes para el desarrollo sustentable del Área Metropolitana de Mendoza.....	33
Índice de sostenibilidad en el periurbano de Mar del Plata.....	45
Sustentabilidad de las Formas de Crecimiento Urbano en el Área Metropolitana de Buenos Aires	57
El Proyecto de Paisaje como Sustentabilidad Urbana: Caso la Cuenca del Gato.....	69
Vegetación y confort en espacios públicos urbanos. Análisis comparativo de plazas de la ciudad de Rosario.....	81
¿En qué medida la forma urbana afecta al comportamiento térmico exterior? Un estudio para reducir la isla de calor urbana en una ciudad árida.	91
03. Paisajes sustentables.....	103
Diseño eficiente de parques en ciudades de zonas áridas. Confort térmico y clima urbano	105
04. Arquitectura Bioclimática y Sustentabilidad	117
Diseño de vivienda para la ciudad de Córdoba, Argentina. Simulación energética y optimización	119
Escuela Bioclimática y Sustentable SECUNDARIA Nº 39, Villa de Antofagasta de la Sierra, CATAMARCA	131
Comportamiento térmico energético de viviendas urbanas en Mendoza y propuestas para alcanzar las bases de NZEB.....	143
Espacios de transición y clima luminoso regional, potenciales barreras de visión funcional	155
Vivienda sustentable para un área rural de la provincia de Tucumán	167
Sala Multipropósito Bioclimática.....	179
Evaluación de confort visual en escenas con iluminación natural directa	189
05. Eficiencia energética edilicia	201

Relevancia de la materialidad de la envolvente exterior en el diseño edilicio energético sustentable en clima cálido	203
Reflexiones sobre el nivel de eficiencia energética de los edificios en Argentina y su relación con las emisiones de gases de efecto invernadero	213
Comportamiento higrotérmico y energético en período estival de un edificio escolar típico en la ciudad de San Juan, Argentina	221
Análisis térmico-energético estival de tipología FONAVI y vivienda bioclimática en la ciudad de San Juan, Argentina	233
Rendimiento térmico de cubiertas verdes sobre techo de chapa en la Ciudad de Córdoba – Argentina.....	243
Cubiertas verdes en zonas áridas. Su eficiencia como estrategia de ahorro energético en verano e invierno.	255
Impacto de los Inputs de Marcos de Ventanas en EnergyPlus en la Estimación de Eficiencia Energética de Edificios.....	267
Impacto de la configuración espacial de patios urbanos en sus condiciones de asoleamiento. Análisis y evaluación del estado del conocimiento y su aplicación al caso de Mendoza	279
Auditoría Energética y Ambiental de una Vivienda Unifamiliar “Tipo Cajón” ubicada en la ciudad de La Plata, Buenos Aires	291
Eficiencia Energética en Escuela Rural de Pellegrini, Santiago del Estero.....	303
07. Patrimonio cultural y sustentabilidad	315
Observatorio para la Gestión Patrimonial de Territorios Rurales de Oasis Andinos.....	317
Turismo alternativo. Estrategia para el desarrollo sostenible desde el aprovechamiento geotérmico. Departamento Iglesia, Provincia San Juan	327
08. Conservación preventiva en Museos, Bibliotecas y Archivos.....	339
Definición de parámetros higrotérmicos locales para conservación preventiva en edificios culturales	341
Estudio interdisciplinario de diagnóstico ambiental para la conservación preventiva en el Museo de La Plata	351
El monitoreo ambiental edilicio como estrategia de conservación preventiva. Estudio del caso del Museo de Arte Contemporáneo Beato Angélico	363
09. Evaluación y certificación de sustentabilidad	375
Evaluación de la climatización en locales comerciales, integrando técnicas de termografía, simulación y modelado por Elementos Finitos. Caso Tienda Caracol	377
Herramientas de Evaluación de la Sustentabilidad Edilicia. Análisis Comparativo desde la Perspectiva Argentina	389
Evaluación de los indicadores de desempeño en edificios del Mercosur.....	401
10. Modelización y simulación	411
Optimización de Consumo Energético de un Modelo de Diseño Paramétrico	413
Potencial de las Herramientas de Simulación para la Planificación Sustentable del Desarrollo Urbano	425
Modelo de simulación aplicado a territorios vulnerables.....	437
11. Materiales y técnicas de construcción sustentable.....	449
Análisis de resistencias térmicas de muros exteriores en cinco locales, empleo de productos en base a hormigones que incorporan residuos.....	451
Bloque de hormigón liviano con agregados reciclados apto para generar una huerta vertical.....	463
Manos de tierra: Recuperando saberes en territorios vulnerables	475
Hormigones sustentables, tratamientos sobre agregados reciclados	485
12. Gestión de los residuos de construcción.....	497
Sistema BIM de cuantificación automática de los residuos de construcción y demolición. Método de transferencias ponderadas de la medición	499
13. Sistemas e instalaciones sustentables.....	509

Sistema de implementos para baños secos. Inodoro y cámara de almacenamiento/tratamiento	511
14. Integración de Energías Renovables	517
Las barreras que limitan la generación energética residencial en la estructura urbana actual Argentina	519
Dificultades de la integración de las energías alternativas a la arquitectura	531
15. Sustentabilidad en las políticas públicas y legislación	543
Incorporación de exigencias sobre eficiencia energética edilicia. Normativa caso Rosario	545
Desarrollo urbano sostenible de áreas de piedemonte. El caso del Área Metropolitana de Mendoza	555
Puntos de ruido en San Miguel de Tucumán, investigación, evaluación y recomendaciones	567
17. Educación y formación en sustentabilidad	579
Sustentabilidad en Arquitectura y Urbanismo: Iniciativas del CPAU en la Ciudad de Buenos Aires	581
Evaluación de Sustentabilidad del Hábitat Residencial Articulando Enfoques “Morfológico y Bioclimático”	591
Modelado térmico-energético edilicio como instrumento didáctico: Aplicación práctica en Asignatura de Arquitectura Sustentable	603
Evaluación del dictado del módulo Construcción Sustentable en una Maestría Interdisciplinaria	615
Hacia un diseño constructivo responsable El desafío de materializar la arquitectura en el mundo que viene	623
Mejoramiento del hábitat precario	635
Autores	645

Cubiertas verdes en zonas áridas. Su eficiencia como estrategia de ahorro energético en verano e invierno.

J. Emiliano Flores Asin¹, Claudia F. Martinez¹, M. Alicia Cantón¹, Erica N. Correa¹

Resumen

Los techos vegetados constituyen estrategias de enverdecimiento que a escala edilicia controlan las altas temperaturas estivales en espacios interiores y a escala urbana contribuyen a mitigar el fenómeno isla de calor. Este trabajo evalúa, el efecto de cubiertas vegetadas con especies adaptadas -*Aptenia cordifolia*, *Sedum spectabile*- a climas cálido-secos sobre el comportamiento térmico de espacios interiores y su consecuente ahorro energético. Metodológicamente se ha monitoreado el desempeño térmico durante verano e invierno en tres box experimentales -uno con cubierta tradicional y dos vegetados-. Los resultados indican que las cubiertas vegetadas en verano disminuyen la temperatura interior 1,6 °C generando ahorros medios de energía para refrigeración del 30-35 %. En invierno si bien no hay variaciones notables, se observan ahorros energéticos diurnos del 2-4 %. El diseño de esta tecnología requiere evaluarse a nivel local para maximizar su eficiencia energética y garantizar la sustentabilidad urbano-edificio según los recursos y tecnologías disponibles.

Palabras clave: Techos verdes, Comportamiento térmico, Ahorro energético, Zonas áridas.

Green Roofs in Arid Cities. Efficiency as Energy Saving Strategy in Summer and Winter.

Abstract

Green roofs are greening strategies that controls the high summer temperatures in the indoor spaces at building scale and help mitigate the heat island phenomenon in urban scale. This work evaluates the effect of vegetated roofs with adapted species -*Aptenia cordifolia*, *Sedum spectabile*- in warm-dry climate in relation to the thermal behavior of indoors spaces and the consequent energy savings. Methodologically the thermal performance during summer and winter has monitored, in three experimental boxes- one with a traditional roof and two with vegetated roofs-. The results indicate that in the green roofs, indoor summer temperature decreases of 1,6 °C generate energy savings for refrigeration of 30 to 35%. In winter, although there are not notable variations, diurnal energy savings of 2-4% is observed. The design of these new technologies should be assessed at local level to

¹ Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE CCT CONICET Mendoza). Av. Ruiz Leal, s/n. Parque General San Martín, Ciudad de Mendoza, Argentina. Tel: +54-261-524-4310. e-mail: eflores@mendoza-conicet.gob.ar

maximize energy efficiency and ensure urban-building sustainability according to resources and technologies available.

Palabras clave: Green Roofs, Thermal Behavior, Energy Savings, Arid Cities.

Introducción

En ciudades de elevada antropización, el sellamiento de suelos, el uso de materiales inadecuados en envolventes edilicias y el calor generado por motores de combustión, principalmente, ocasionan una diferencia de temperatura entre el espacio urbano y el espacio circundante no urbano, que se denomina efecto de isla de calor urbano (ICU) (Alchapar y Correa, 2013). El aumento de temperatura en zonas urbanas derivado del fenómeno de ICU provoca un mayor consumo energético destinado a refrigeración para el acondicionamiento térmico de edificios. El uso eficiente de la energía es uno de los pilares de la sostenibilidad urbana en ciudades consolidadas y la aplicación de políticas para tal fin tiene suma relevancia en un contexto de aumento de su demanda debido al crecimiento económico e industrial y a mayores exigencias de habitabilidad (Rosenfeld et al., 2007; Cárdenas, 2011).

La incorporación de estrategias de mitigación del efecto de ICU, en un contexto de planificación urbana, colaborará a que la temperatura en las ciudades se aproxime al rango de confort para el ser humano, evitando que luego se deba consumir mayor cantidad de energía para contrarrestar este fenómeno. La valoración de la sustentabilidad urbana deja de manifiesto el rol de la vegetación (Pincetl, 2012), ya que la misma puede reducir las temperaturas urbanas de 0,5 a 4,0 °C (Qiu et al., 2013). Una de las principales estrategias de mitigación de ICU es la incorporación de espacios verdes en vacíos urbanos a través de parques, plazas, arbolado de alineación vial, patios y nuevas tecnologías como muros y techos vegetados. Las nuevas tecnologías verdes, permiten la incorporación de vegetación a envolventes edilicias en ciudades consolidadas donde no se cuenta con vacíos urbanos disponibles para otro tipo de estructura verde tradicional. Estudios previos han demostrado que dependiendo del clima de la región y de la cantidad de vegetación, la economía de energía que generan estas tecnologías, varía entre un 35-95% (Alexandri y Jones, 2006).

A nivel internacional, la incorporación de nuevas tecnologías verdes está en auge, ya que impacta en la reducción de los efectos del calentamiento global, la contaminación atmosférica y el nivel de ruidos, como también en la disminución del efecto de la ICU y en el acondicionamiento térmico edilicio, con la consecuente disminución de los consumos de energía (Dunnet y Kingsbury, 2004; Wonga et al., 2009). Si bien en Europa y América del Norte estas tecnologías ya están siendo aplicadas, su incorporación a los contextos locales se encuentra aún en fase de experimentación.

En Argentina, el interés por estas tecnologías se ha incrementado desde el año 2013 con la aprobación de la Ley N°4.428. Esta ley tiene por objeto la implementación de “Techos o Terrazas Verdes” en el ámbito de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Dicha ley menciona que los propietarios de edificaciones que implementen y mantengan techos verdes, gozarán de una reducción de hasta el 20% las tasas de alumbrado, barrido y limpieza. Tal estímulo promueve el uso de la tecnología y colabora al metabolismo urbano trayendo grandes beneficios a nivel urbano. Sin embargo, su implementación requiere evaluar el desempeño termo-energético en la zona.

En particular, a nivel local la mayor parte del territorio de la provincia de Mendoza se ubica integrando el mosaico mundial de las Zonas Áridas. La incorporación de vegetación en estas zonas

presenta condicionantes específicas: alta insolación y amplitud térmica; baja precipitación y humedad relativa. Por ende, la manutención de espacios verdes depende de riego artificial.

En el Área Metropolitana de Mendoza (AMM) resultados de mediciones en prototipos experimentales indican que en espacios interiores a la cubierta vegetada, disminuciones de temperatura de 1,5 a 1,6 °C generarían ahorros de energía eléctrica destinada a refrigeración del orden del 32% al 34% en la estación de verano (Flores Asin et al., 2015). Otros autores han evaluado el comportamiento térmico de las cubiertas vegetadas en la estación invierno determinando que la temperatura en el sustrato es 7 a 8 °C más elevada que la temperatura alcanzada en cubiertas tradicionales y sus consecuentes ahorros energéticos destinados a calefacción (Teemusk y Mander, 2010).

Para el AMM, emplazada en un contexto árido, se plantea la necesidad de avanzar en el estudio y desarrollo de sistemas de naturación urbana que empleen especies de bajo consumo hídrico, y que permitan un apropiado acondicionamiento térmico. El potencial de incorporación de nuevas tecnologías verdes es elevado en la alta densidad constructiva de la ciudad capital -61%- (Flores Asin et al., 2013). La aplicación de estas tecnologías -con adaptación a restricciones hídricas- permitiría incorporar masa vegetal al espacio urbano-edilicio y contribuiría al ahorro energético.

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar el efecto de cubiertas vegetadas en el comportamiento térmico de espacios interiores y su consecuente ahorro energético, en verano e invierno en zonas de clima cálido-seco.

Metodología

1. Diseño experimental

El diseño experimental sigue la metodología propuesta por La Roche (2009) y tiene por objeto analizar en forma comparativa la influencia de cubiertas tradicionales y de cubiertas vegetadas adaptadas a los condicionantes locales, sobre el comportamiento térmico de espacios interiores. A tal fin, en el área experimental del CCT CONICET Mendoza (latitud 32°53'52.83"S, longitud 68°52'31.30"O) se montaron tres box de ensayo: un box testigo con cubierta tradicional sin vegetar (CT) y dos box con cubiertas vegetadas con distintos paquetes biológicos (denominadas CV1 y CV2).

Los box de ensayo conforman volúmenes ciegos de 1 m³, de carácter liviano y aislado al exterior. Tecnológicamente, muros y pisos están compuestos por tres capas: placa cementicia en la cara interior (espesor 10 mm), aislación térmica de poliestireno expandido de baja densidad (espesor 50 mm) y placa de fenólico en la cara exterior (espesor 18 mm), acabado esmalte sintético color blanco. La cubierta es de hormigón armado (espesor 150 mm; peso específico 2400 Kg/m³; dosificación en volumen: 1-3-3 cemento, árido grueso y fino, aislada hidráulicamente (membrana Sika® Sarnafil F 610-12 Felt). Ésta última, tiene por objeto evaluar el tipo constructivo comúnmente empleado en la resolución de techos en el parque edilicio del AMM.

La cubierta vegetada está definida por un manto drenante Sika® GR Aquadrain Extensivo, un sistema de riego por goteo subsuperficial, sacos de geotextil (3) contenedores del sustrato (arena, orujo agotado y turba negra en iguales proporciones; espesor 150 mm) y las especies vegetales. En este trabajo se evalúan dos especies de disponibilidad local y alta tasa de reproducción agámica: *Aptenia cordifolia* (L. f.) Schwant. "Baby rose" y *Sedum spectabile* (Boreau) H. Ohba "Sedum otoño" (Fig. 1).

Figura 1: Diseño Experimental.

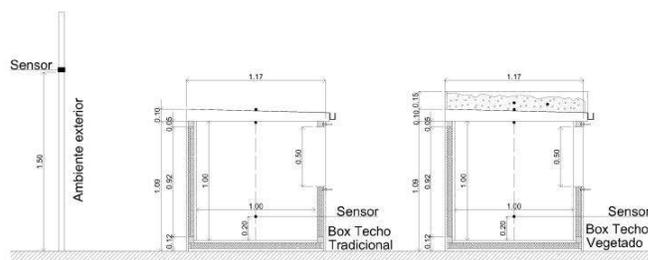
Características de las especies vegetales evaluadas.		Cubierta vegetada <i>Aptenia cordifolia</i> (CV1)	Cubierta vegetada <i>Sedum spectabile</i> (CV2)	Cubierta testigo (CT)
Cobertura (%)	Verano	76,10	79,00	-
	Invierno	80,99	19,70	-
Consumo hídrico (litros.m ² /año)		268	291	-
Hábito de crecimiento		Rastrero	Erguida	-

Fuente: Figura realizada por el autor.

2. Método de medición

El diseño experimental tiene por objeto el desarrollo y monitoreo térmico de ensayos en condiciones controladas. El comportamiento térmico se evalúa a partir del registro de temperaturas -exterior e interiores- en las estaciones de verano e invierno durante periodos de 24 días. Los datos se registraron cada 15 minutos mediante microadquisidores de datos en la siguiente configuración: un sensor fijo del tipo Onset® HOBO® temp/RH logger UX100-003 en el espacio interior del box, dos sensores en la losa de hormigón -cara interna y externa- del tipo termocupla T EL-USB-TC con data logger incluido en cada una; y un sensor de referencia en el espacio abierto (Fig. 2).

Figura 2: Distribución de sensores de temperatura.



Fuente: Figura realizada por el autor.

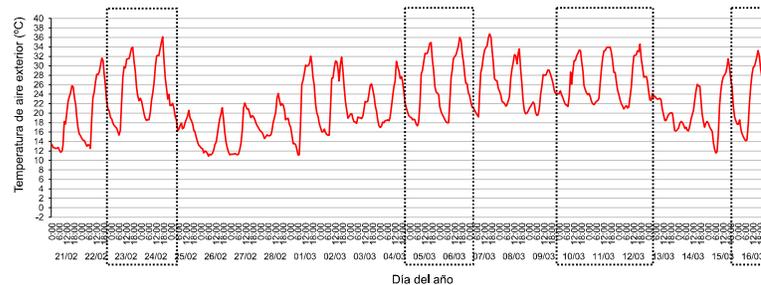
El cálculo de la demanda térmica se realiza mediante el método de grados-hora desarrollado por Erbs, et al. (1987).

Resultados

1. Selección de los días de análisis

1.1 Verano: Dentro de los 24 días que corresponden período de medición, para el análisis del comportamiento térmico y el cálculo de ahorro energético se consideraron 9 días típicos de verano (Figura 3), los cuales se presentan soleados, con una temperatura media de 26,07 °C (media histórica periodo de verano serie temporal de los años 1983 – 2014 de 24,36 °C) y una media de flujo de radiación de 709,1 W/m² - mínima 659,8 W/m², máxima de 739,7 W/m²-(amplitud 79,8 W/m²).

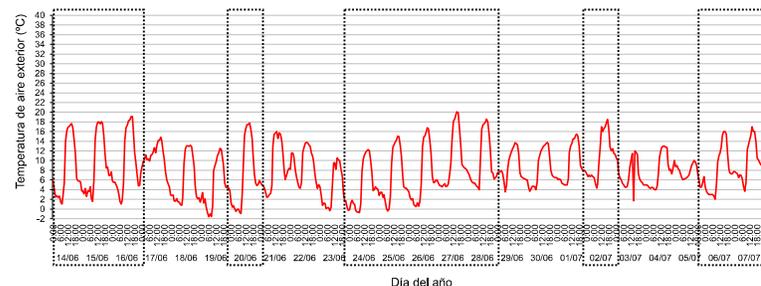
Figura 3. Periodo de medición estación VERANO.



Fuente: Figura realizada por el autor.

1.2 Invierno: Para el análisis del comportamiento térmico y el cálculo de ahorro energético en invierno, dentro de los 24 días del período de medición, se han considerado 12 días típicos (Figura 4). Dichos días se presentaron totalmente soleados con una temperatura media de 8,40 °C (media histórica periodo de invierno serie temporal de los años 1983 – 2014 de 8,90 °C) y una media de flujo de radiación de 456,4 W/m² -mínima 433,3 W/m², máxima 476,0 W/m²- (amplitud 42,7 W/m²).

Figura 4. Periodo de medición estación INVIERNO.



Fuente: Figura realizada por el autor.

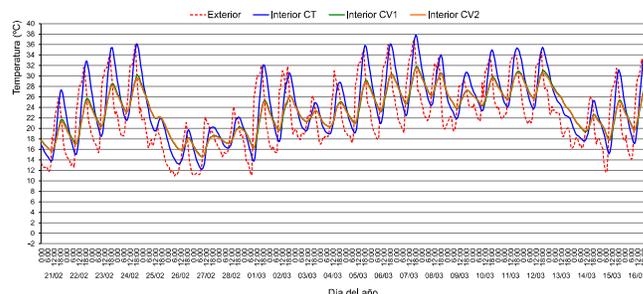
2. Comportamiento térmico

Los resultados obtenidos se analizan en forma comparativa para los tres tratamientos CT, CV1 y CV2 en torno a su comportamiento térmico y al potencial ahorro energético que implicaría su implementación masiva en áreas urbanizadas con clima local. Los datos fueron promediados en forma horaria para una mejor comprensión de los comportamientos globales.

2.1 Verano: Los valores de temperatura exterior en el ciclo de medición oscilaron en un rango comprendido entre 10,90 a 36,80 °C. La temperatura en el interior del box testigo -con cubierta tradicional- presenta una oscilación térmica de comportamiento similar aunque desfasada a la exterior con un máximo de 37,90 °C y un mínimo de 12,20 °C. En cambio, la temperatura en espacios conexos a cubiertas vegetadas presenta un rango de variabilidad de 14,50 a 31,80 °C (Figura 5). Se puede observar que la temperatura máxima interior en los box de ensayo se encuentra desfasada con respecto a la temperatura exterior debido a la masa térmica de la envolvente de los mismos. En días despejados, las temperaturas máximas y mínimas del box testigo -CT- son superiores a las exteriores en todo el ciclo de medición debido al efecto de ganancia solar y al carácter conservativo

resultante de la aislación de muros y pisos que limita la capacidad de enfriamiento del espacio interior durante la noche. Las curvas de temperatura de los box con cubiertas vegetadas -CV- se encuentran amortiguadas respecto a la temperatura exterior y al testigo.

Figura 5. Temperatura exterior e interior en la estación de VERANO



Fuente: Figura realizada por el autor.

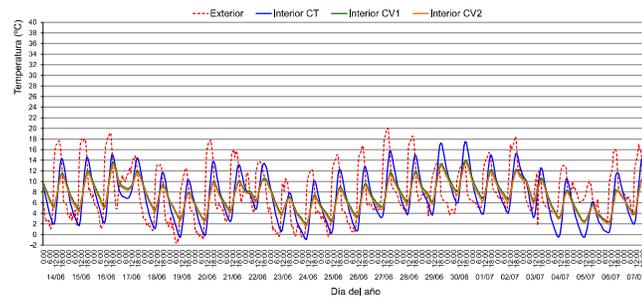
Para los días típicos de verano, la temperatura máxima exterior es similar a la interior en el box CT (35 °C) y muestra diferencias de 5,0 °C respecto a CV1 y CV2. La temperatura media exterior es semejante a CV1 y CV2, y menor respecto al tratamiento CT (1,8 °C). Las temperaturas mínimas en los box son superiores a la exterior debido al efecto de amortiguamiento térmico de la envolvente. Este efecto se acentúa en los tratamientos con cubierta vegetada, alcanzando diferencias respecto a la temperatura exterior de 4,6 °C. En consecuencia, se observa que los tratamientos con tecnología verde amortiguan la amplitud térmica notablemente (6 a 7 °C). Este efecto amortiguador es claramente observable en relación al box testigo cuya amplitud térmica es de 14,4 °C.

Tabla 1: Temperaturas medias exteriores e interiores para los 9 días de análisis en la estación de VERANO

Temperatura (°C)		Exterior		Interior		
				CT	CV1	CV2
	Máx.		34,76	35,61	29,93	29,63
	Med.		26,07	27,83	26,28	26,21
	Mín.		18,48	21,19	23,06	23,05
	ΔT		16,28	14,42	06,87	06,58

Fuente: Tabla realizada por el autor.

2.2 Invierno: Los valores de temperatura exterior en el ciclo de medición oscilaron en un rango comprendido entre -1,62 °C a 20,06 °C. La temperatura en el interior del box testigo -CT- presenta una oscilación térmica menor a la exterior (18,53 °C) con un máximo de 17,57 °C y un mínimo de -0,96 °C. En cambio, la temperatura en espacios conexos a cubiertas vegetadas presenta un rango de variabilidad de 1,60 °C a 14,02 °C (Figura 6). Queda de manifiesto al igual que en la estación de verano que la temperatura máxima interior en los box de ensayo se encuentra desfasada con respecto a la temperatura exterior. En días despejados, las temperaturas máximas del box testigo -CT- son inferiores a las exteriores en todo el ciclo de medición debido a la baja intensidad de radiación consecuencia de la altitud solar y la inercia de la losa de hormigón. Las temperaturas mínimas del box CT se encuentran por debajo de las temperaturas mínimas exteriores debido al efecto de la membrana que actúa como un material selectivo frío. Las curvas de temperatura de los box con cubiertas vegetadas -CV- se encuentran amortiguadas respecto a la temperatura exterior y al testigo debido a las características intrínsecas a la tecnología verde.

Figura 6. Temperatura exterior e interior en la estación de INVIERNO

Fuente: Figura realizada por el autor.

Al analizar los días típicos de invierno, se observa que la temperatura máxima exterior es mayor en 3,8 °C a la interior en el box CT, en cambio para las cubiertas vegetadas las temperaturas máximas interiores son menores respecto a la exterior en un valor de 6,6 °C a 6,9 °C, para CV1 y CV2 respectivamente. La temperatura media interior del box CT es menor a la exterior en 1,4 °C, en cambio para el box CV1 esa diferencia es de 1,2 °C y para CV2 es de 1,6 °C. La temperatura mínima presenta valores cercanos en el exterior (1,7 °C) como en el interior del box CT (1,6 °C). En cambio, los casos CV2 Y CV1 presentan mínimas de 3,8 a 4,2 °C superior al box CT, respectivamente. Estos resultados demuestran que las temperaturas mínimas medias son superiores en 2,2 a 2,6 °C con cubiertas vegetadas respecto a una cubierta tradicional, lo que demuestra su mejora en términos de transferencia de calor en la cubierta como parte de la envolvente, dotándola de características conservativas respecto a la energía en espacios interiores. La temperatura exterior presenta una amplitud térmica media de 15,5 °C. Al observar las amplitudes térmicas medias interiores se observa una diferencia de 3,3 °C entre el box CT respecto a la exterior. En cambio la amplitud térmica registrada en el interior de los box CV1 y CV2 es menor a la exterior y está en el orden de los 6,5 °C, en comparación a los 15,5 °C de la temperatura exterior. Esto demuestra la eficiencia del poder aislante de las cubiertas vegetadas como también se observó en la estación de verano (Tabla 1).

Tabla 2: Temperaturas medias exteriores e interiores para los 12 días de análisis en la estación de INVIERNO

Temperatura (°C)		Exterior	Interior		
			CT	CV1	CV2
	Máx.	17,24	13,74	10,68	10,38
	Med.	08,45	07,01	07,21	06,88
	Mín.	01,72	01,56	04,18	03,81
	ΔT	15,52	12,18	06,50	06,57

Fuente: Tabla realizada por el autor.

3. Potencial de ahorro energético

3.1. Verano: En los tres tratamientos, la temperatura promedio diaria interior para los 9 días de análisis alcanza valores de 27,83 °C en CT, 26,28 °C en CV1 y 26,21 °C en CV2. En todos los casos, dichas temperaturas se encuentran por encima de la temperatura de confort -23 °C- (Tabla 2). Los box CV1 y CV2 presentan una diferencia entre temperaturas medias del orden de 1,5 °C y 1,6 °C respecto al testigo (Tabla 3). Esto se debe al efecto de las cubiertas vegetadas en las temperaturas medias interiores. La variación leve de la temperatura media entre CV1 y CV2 se explica por las diferencias intrínsecas a las especies vegetales utilizadas.

Tabla 3: Impacto de las temperaturas exteriores en los espacios interiores en días típicos.

Día	T (°C) promedio diaria exterior	T (°C) promedio diaria interior			Δt diaria interior = CT-CV	
		CT	CV1	CV2	CT - CV1	CT - CV2
1	24,77	26,31	24,15	24,03	2,15	2,28
2	25,63	28,15	26,37	26,16	1,78	1,99
3	25,70	26,39	24,57	24,57	1,82	1,82
4	26,47	28,23	26,69	26,71	1,53	1,52
5	27,58	29,63	28,11	28,13	1,52	1,51
6	26,77	28,43	26,75	26,77	1,68	1,65
7	27,75	29,48	28,11	28,02	1,38	1,47
8	26,81	29,34	28,42	28,20	0,92	1,14
9	23,13	24,54	23,37	23,30	1,17	1,24
Promedio	26,07	27,83	26,28	26,21	1,55	1,62

Fuente: Tabla realizada por el autor.

Análisis hora-hora para el periodo de calentamiento y de enfriamiento

Con el fin de analizar comparativamente el comportamiento térmico y su consecuente ahorro energético en función de cada tratamiento y de la termofase del día, ya sea calentamiento o enfriamiento, se han realizado los cálculos correspondientes a los mismos.

La determinación del consumo energético derivado de la necesidad de enfriamiento o de calentamiento, se realiza mediante el cálculo de las diferencias de temperatura hora a hora para cada termofase (temperatura de confort 23 °C). Dichos valores fueron calculados para los 9 días de análisis. El cociente entre la sumatoria de diferencias de temperatura hora a hora para cada periodo permite definir los requerimientos de energía de CV1 y CV2 respecto al box testigo -CT- (Tabla 4).

Los resultados muestran que variaciones interiores de temperatura del orden de 1,25 °C generan ahorros de energía del 65% para CV1 en el periodo de calentamiento y variaciones de 1,76 °C generan ahorros de energía del 69% durante el enfriamiento (Tabla 4, Figura 6). En cambio para CV2, variaciones interiores de temperatura del orden de 1,08 °C generan ahorros de energía del 70% en el periodo de calentamiento y variaciones de 2,01 °C generan ahorros de energía del 65% durante el enfriamiento. De estos resultados se concluye que, aunque con pequeñas diferencias, el tratamiento CV1 demuestra ser más eficiente durante la noche y el tratamiento CV2 durante el día.

Tabla 4. Promedio de temperaturas horarias por termofase en días típicos de VERANO. Consumos energéticos relativos para CV1 y CV2.

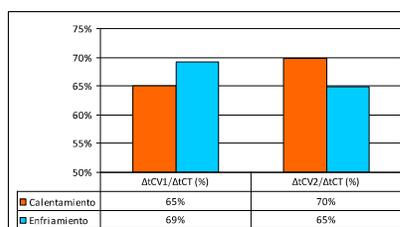
	T (°C) exterior	T (°C) interior			Δt interior = CT-CV		ΣΔtCT (°C)	ΣΔtCV1 (°C)	ΣΔtCV2 (°C)
		CT	CV1	CV2	CT - CV1	CT - CV2			
Calentamiento	30,31	26,58	25,33	25,50	1,25	1,08	322,25	209,53	225,05
Enfriamiento	23,03	28,73	26,96	26,72	1,76	2,01	721,81	499,46	468,18
							Σ 1044,06	708,99	693,23

Fuente: Tabla realizada por el autor.

El consumo energético, respecto al testigo (CT), muestra un consumo del 65% para el tratamiento CV1 y del 70% para CV2 para el periodo de calentamiento. En cambio, para el periodo de enfriamiento se puede observar –contrario al calentamiento- que el box CV1 (69%) presenta mayor eficiencia que el box CV2 (65%), lo que se debe a las características intrínsecas de cada especie vegetal (Figura 6). El consumo energético diferencial por especie y por periodo podría explicarse por lo siguiente: el hábito rastrero y compacto de la especie *Aptenia cordifolia* utilizada en CV1 podría

permitir la llegada de mayor cantidad de flujo radiativo solar que *Sedum spectabile* en CV2, y permitiendo una mayor transferencia térmica por conducción, menor eficiencia de día (mayor ganancia) como de noche (mayor capacidad de enfriamiento) respecto a *Sedum spectabile* que presenta hábito arbustivo y una condición abierta. Su morfología posibilitaría menor ganancia diurna por sombreado de la cubierta y menor intercambio radiativo y convectivo hacia la bóveda celeste debido a su porte arbustivo, dificultando el enfriamiento nocturno.

Figura 6. Consumo energético (%) de CV1 y CV2 relativo a CT en VERANO



Fuente: Figura realizada por el autor.

3.2. Invierno: En los tres tratamientos, la temperatura promedio diaria interior para los 12 días de análisis alcanza valores de 7,05 °C en CT, 7,11 °C en CV1 y 6,77 °C en CV2. En todos los casos, dichas temperaturas se encuentran por debajo de la temperatura de confort para la estación -18 °C- (Tabla 5). Los box CV1 y CV2 respecto al testigo presentan diferencias mínimas entre temperaturas medias del orden de 0,06 °C y 0,28 °C, respectivamente. Lo que indica que ambas cubiertas vegetadas presentan temperaturas medias similares a las del box CT. La variación leve de la temperatura media entre CV1 y CV2 se explica por las diferencias intrínsecas a las especies vegetales utilizadas.

Tabla 5: Impacto de las temperaturas exteriores en los espacios interiores en días típicos.

Día	T (°C) promedio diaria exterior	T (°C) promedio diaria interior			Δt diaria interior = CT-CV	
		CT	CV1	CV2	CT - CV1	CT - CV2
1	4,98	3,88	4,50	4,22	-0,61	-0,33
2	6,69	5,68	5,62	5,30	0,06	0,37
3	6,99	6,17	6,34	6,00	-0,17	0,17
4	10,18	8,37	7,94	7,52	0,43	0,84
5	9,76	8,90	8,86	8,45	0,04	0,45
6	9,30	8,90	9,46	9,02	-0,57	-0,12
7	11,02	9,15	9,35	8,93	-0,20	0,22
8	7,93	4,96	4,93	4,68	0,03	0,28
9	9,95	7,45	7,00	6,84	0,45	0,61
Promedio	8,53	7,05	7,11	6,77	-0,06	0,28

Fuente: Tabla realizada por el autor.

Análisis hora-hora para el periodo de calentamiento y de enfriamiento

Los consumos energéticos han sido determinados con el mismo criterio que para la estación de verano. En este caso se asume una temperatura de confort 18 °C. Dichos valores fueron calculados para los 12 días de análisis. El cociente entre la sumatoria de diferencias de temperatura hora a hora permite definir los requerimientos de energía de CV1 y CV2 respecto al box testigo -CT- (Tabla 6). Los resultados muestran leves diferencias de temperatura entre CV1 y CV2 en relación al testigo, para el calentamiento y el enfriamiento de - 0,25 y 0,36; respectivamente- (Tabla 6).

Tabla 6. Promedio de temperaturas horarias por termofase en días típicos de INVIERNO. Consumos energéticos relativos para CV1 y CV2.

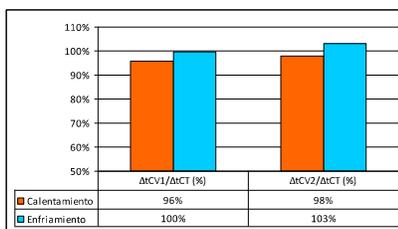
	T (°C) exterior	T (°C) interior			Δt interior = CT-CV		ΣΔtCT (°C)	ΣΔtCV1 (°C)	ΣΔtCV2 (°C)	
		CT	CV1	CV2	CT - CV1	CT - CV2				
Calentamiento	13,77	5,97	6,47	6,22	-0,51	-0,25	1167,28	1117,93	1142,64	
Enfriamiento	5,74	7,53	7,58	7,22	-0,04	0,31	1999,15	1990,64	2058,67	
							Σ	3166,43	3108,57	3201,31

Fuente: Tabla realizada por el autor.

El consumo energético, respecto al testigo (CT), muestra un consumo del 96% para el tratamiento CV1 y del 98% para CV2 para el periodo de calentamiento. Para el periodo de enfriamiento -al igual que en el periodo de calentamiento- se puede observar que el box CV1 (100%) presenta menor eficiencia que el box CV2 (103%). El consumo energético diferencial por especie y por periodo podría explicarse -como se mencionó en la estación de verano- por la arquitectura de ambas especies en las cubiertas vegetadas. El tratamiento CV1, vegetado con *Aptenia cordifolia*, permite la penetración de un flujo de calor hacia el interior, logrando mayor eficiencia de día que CV2 y no demuestra un comportamiento diferencial al tratamiento testigo durante la noche (periodo de enfriamiento), por lo cual su beneficio se registraría sólo durante el día. En cambio para CV2 se observa un ahorro energético menor a CV1 durante ambas termofases y durante la noche un consumo energético superior al del box CT (Figura 7). El comportamiento termo-energético de CV2 se explicaría por las características de la especie *Sedum spectabile*, la cual presenta su etapa de mayor crecimiento y desarrollo en primavera-verano y una etapa de senescencia y muerte de la parte aérea o dosel en otoño-invierno. La escasa cobertura -19,70 %- de esta especie en la estación invernal deja de manifiesto que al disponer la cubierta de mayor cantidad de suelo desnudo permitiría mayor intercambio radiativo y convectivo hacia la bóveda celeste, facilitando el enfriamiento nocturno y por ende, enfriando el interior aún más que una cubierta vegetada con mayor cobertura -CV1-.

El consumo energético de CV2 muestra un comportamiento conservativo debido al rol como aislante térmico de la cubierta vegetada durante la termofase de calentamiento en comparación al box testigo con un ahorro de energía de un 2%. Pero durante la noche -termofase de enfriamiento- el consumo energético de CV2 es superior en 3% al box CT. Esto último podría deberse a un balance térmico desfavorable para el comportamiento conservativo en el periodo de enfriamiento debido a la ausencia de la protección que lograría una mayor cobertura vegetal y a la mayor masa térmica - respecto al box CT- aportada principalmente por el sustrato que funcionaría como enfriador del espacio interior contrarrestando el beneficio del periodo de calentamiento.

Figura 7. Consumo energético (%) de CV1 y CV2 relativo a CT en INVIERNO



Fuente: Figura realizada por el autor.

Conclusiones

De los resultados obtenidos mediante ensayos experimentales se puede concluir que en la estación de verano, el uso de cubiertas vegetadas permite amortiguar las temperaturas en espacios interiores, con un consecuente ahorro energético. Las cubiertas vegetadas disminuyen la amplitud térmica interior alrededor de 7 °C y la temperatura máxima alrededor de 5 °C. Además, la temperatura media interior fue de 1,5 °C menor respecto a un techo tradicional sin vegetar. La disminución de la temperatura en espacios interiores contribuye a optimizar los consumos de energía. Diferencias en la temperatura interior del orden de 1,5-1,6 °C generan ahorros de energía para refrigeración del 30% al 35%. El ahorro es función de la termofase del día -calentamiento o enfriamiento- y de la especie vegetal que se utilice en la cubierta. Las termofases han sido analizadas en este trabajo en función de diferencias de temperatura, no en términos de la contribución relativa de cada uno de los mecanismos de transferencia de calor a la producción de tal efecto. En etapas futuras se pretende discernir el aporte de cada mecanismo de transferencia de calor al efecto global aquí presentado.

La cubierta vegetada con *Aptenia cordifolia* demostró mejorar el confort térmico interior disminuyendo las temperaturas máximas y medias respecto a una cubierta tradicional. El aporte al confort térmico producto de esta cubierta vegetada -*Aptenia cordifolia*- se traduce en un ahorro energético del 35% de la energía que se debería destinar a refrigeración en el periodo de calentamiento y del 31% en el periodo de enfriamiento. Vegetar la cubierta con la especie *Sedum spectabile* permite un menor ahorro de energía durante el enfriamiento -30%- que con *Aptenia cordifolia*, si bien produce un significativo ahorro respecto a la cubierta tradicional sin vegetar. En cambio, en el periodo de enfriamiento, *Sedum spectabile*, presenta mejor comportamiento termo-energético que *Aptenia cordifolia*, logrando un ahorro del 35%. Estos resultados muestran la importancia de la selección de especies con el fin de optimizar el comportamiento termo-energético, según el uso, diseño y materialidad de la edificación a intervenir.

En la estación de invierno los beneficios son menores a los del verano y el comportamiento termo-energético depende de la especie utilizada. Con cubiertas vegetadas hubo una disminución de 8 °C en la amplitud térmica y un aumento de la temperatura mínima interior de al menos 2 °C. La temperatura media interior es similar en esta estación en los tres box de ensayo, ya sea con o sin cubierta vegetada. La cubierta vegetada con *Aptenia cordifolia* presenta mayor ahorro energético para calefacción -4%- en el periodo de calentamiento, pero en el periodo de enfriamiento se comporta -en términos energéticos- del mismo modo que una cubierta tradicional sin vegetar. El comportamiento térmico de la cubierta vegetada con *Sedum spectabile* logra un ahorro de energía para calefacción en el periodo de calentamiento de 2% pero en el periodo de enfriamiento consume en su interior un 3% más que un espacio con cubierta tradicional. Lo cual, al igual que en verano, resalta la importancia del diseño de la tecnología con el fin de optimizar el comportamiento interior.

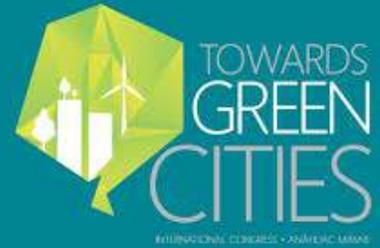
A nivel internacional se encuentran numerosos trabajos científicos de comportamiento térmico y energético de cubiertas vegetadas principalmente para zonas en las que no es necesario realizar aportes artificiales de agua. El aporte de este trabajo se circunscribe al contexto árido y las dificultades de seleccionar adecuadamente las especies a utilizar con su consecuente efecto termo-energético. El efecto estacional puede ser diferente con la misma especie, lo que valoriza el estudio local de diferentes especies y combinaciones de las mismas en distintas épocas del año.

Bibliografía

- Alchapar, N. y Correa E. (2013). Modificación de la reflectancia solar en la envolvente edilicia y su impacto sobre las temperaturas interiores. Revista AVERMA. Vol. 1, pp. 05. 69-05.78, 2013.
- Alexandri, E., Jones, P. (2006). Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roof in diverse climates. Science Direct – Elsevier Ltd
- Cárdenas, G. J. (2011). Matriz energética argentina. Situación actual y posibilidades de diversificación. Revista de la Bolsa de Comercio de Rosario. 32-36. <http://www.eeaoc.org.ar/upload/contenido/pdf/20120228122933000000.pdf>
- Dunnett, N.; Kingsbury, N. (2004). Planting Green Roofs and Living Walls. Timber Press Inc, Oregon.
- Erbs D.G. (1987). Degree Day for Variable Base Temperatures. Proceedings of International Solar Energy Society (ISES). Vol. N° 6, pp. 387-391. Ed. J. Hages and W. Kollar.
- Flores Asin, J. E., Martinez, C. F.; Cantón, M. A. (2013). Tecnologías verdes. Potencial de aplicación en el Área Metropolitana de Mendoza (AMM). Acta de la XXXVI Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 1, pp. 05.115-05.120, 2013. ISBN 978-987-29873-0-5
- Flores Asin, J. E., Martinez, C. F.; Cantón, M. A. y Correa E. N. (2015). Impacto de cubiertas vegetadas en el ahorro energético del parque edilicio del área metropolitana de Mendoza (AMM). Acta de la XXXVIII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 3, pp. 05.81-05.89, 2015. ISBN 978-987-29873-0-5
- La Roche, P. (2009). Low Cost Green Roofs for Cooling: Experimental series in a hot and dry climate. PLEA 26th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Quebec, Canada 22-24 June 2009.
- Pincetl, S. (2012). Nature, Urban Development and Sustainability – What New Elements are Needed for a More Comprehensive Understanding? Cities: Current Research on Cities, 29:S32-S37
- Qiu G., Li H., Zhang Q., Chen W., Liang X. y Li X. (2013). Effects of Evapotranspiration on Mitigation of Urban Temperature by Vegetation and Urban Agriculture. *Journal of Integrative Agriculture*, n° 12, pp. 1307-1315.
- Rosenfeld E., San Juan G, Discoli C, Martini I, Ferreyro C, Barbero D. (2007) Ahorro de energía en el sector residencial. Su contribución a la disminución de gases de efecto invernadero (GEI). Revista AVERMA. Vol. 11: 07.31-07.38.
- Teemusk A, Mander U. (2010). Temperature regime of planted roofs compared with conventional roofing systems. *Ecol Eng* 2010; 36:91-105.
- Wonga, N. H.; Tan A. Y.; Tan, P. Y; Wongc, N.C. (2009). Energy Simulation of Vertical Greenery Systems. *Energy and Buildings*, Lausanne, v.41, n,12, p.1401-1408.

Autores

J. Emiliano Flores Asin es Ingeniero Agrónomo y becario doctoral ANPCyT. **Claudia F. Martinez** es Ingeniera Agrónoma, Doctora en Ciencias Biológicas e Investigadora Adjunta de CONICET. **M. Alicia Cantón** es Arquitecta, DAE en Arquitectura, Investigadora Independiente de CONICET y Profesora en FAUD-Universidad de Mendoza. **Erica N. Correa** es Ingeniera Química, Doctora en Ciencias - Área Energías Renovables, Investigadora Independiente de CONICET y Profesora en UTN-FRM.



CIUDADES VERDES

TEORÍA Y PRÁCTICA HACIA LA SOSTENIBILIDAD URBANA





CIUDADES VERDES

TEORÍA Y PRÁCTICA
HACIA LA SOSTENIBILIDAD URBANA



Rector

P. Rafael Pardo Hervás, L.C.

Vicerrectoría Académica

Dr. Narciso Antonio Acuña González

Dirección de Desarrollo Académico e Investigación

Dra. Susana Guzmán Silva

Coordinación de Investigación y Publicaciones

Dr. Jaime Antonio Zaldívar Rae

Dirección de la Escuela de Arquitectura

Mtra. Martha Tello Rodríguez

CIUDADES VERDES.**Teoría y práctica hacia la sostenibilidad urbana. ***

D.R. © Universidad del Mayab, S.C.

Km. 15.5 Carretera Mérida a Progreso, Int. Km. 2
Carretera a Chablekal. Mérida, Yuc., Méx. C.P. 97310.

Editado por la Escuela de Arquitectura de la
Universidad Anáhuac Mayab y el apoyo del
proyecto CONAVI-CONACYT clave 2013-206715.

Diseño Editorial

LD. Gabriela Oropeza Moreno
gaby_oropeza@yahoo.com.mx

Coordinación de la publicación

Dra. Sofía Constanza Fregoso Lomas
sofia.fregoso@anahuac.mx

ISBN: 978-607-8083-21-3

Derechos exclusivos para la Universidad del Mayab, S.C.
Prohibida su reproducción total o parcial por cualquier
medio, sin autorización escrita del titular de los derechos.

(*) El Congreso Internacional Towards Green Cities 2016 y este documento fueron desarrollados con recursos del fondo sectorial S0003 FONSEC CONAFOVI correspondientes al proyecto 206715 "Innovación, eficiencia y sustentabilidad en conjuntos urbanos en México. Guía para el diagnóstico y certificación del desempeño de conjuntos urbanos y propuestas de diseño por región bioclimática" y forman parte de las actividades de transferencia de conocimiento del Grupo de Investigación en "Calidad Ambiental y Desempeño Urbano-Arquitectónico" de la Universidad Anáhuac Mayab.



Tabla de contenido

- vi Agradecimientos.
- ix Presentación.
- xi Discurso inaugural del Congreso Towards Green Cities.
- 3 **Propuestas de diseño y rehabilitación urbana tendientes a reducir las temperaturas de la ciudad en Mendoza, Argentina.**
Alchapar, N. L. | Correa, E. N.
- 19 **Landscape costs of public participation in the tourism planning process in Cancun.**
Aldape P., G.
- 39 **Evaluación de la sustentabilidad de tecnologías de generación de electricidad a partir de Residuos Sólidos Urbanos (RSU).**
Ávila, C. | González, G. | Cedano, K.
- 51 **Análisis de propuestas para la conectividad ecológica urbana en Bogotá D.C.**
Bohórquez, C. | Bolaños, T.
- 73 **Diseño Bioclimático para la habitabilidad térmica de espacios públicos exteriores en clima cálido seco.**
Bojórquez-Morales, G. | Urías-Barrera, H. | García-Cueto, R. | Jiménez-López
- 87 **La nueva visión de ciudad “hacia una transformación y actuación sustentable”.**
Bolio, E. | Aragón, A.
- 97 **Marco de referencia para la actuación municipal en materia de medio ambiente y desarrollo urbano sustentable.**
Bolio A., E. | Vázquez V., C. M.
- 111 **Ordenamiento sustentable del territorio y paisaje del noroeste del Valle de Colima.**
Cárdenas M., F. J.

- 131 Sistema de captación de aguas pluviales y ahorro de energía eléctrica, caso del proyecto Plaza de armas Tampico, TAM.
Cruz H., M. S. | Montalvo T., S.
- 145 Una ciudad posible.
Duarte A., E. | Lara N., I. | Alcocer Á., F.
- 157 Creación del capital social por un urbanismo sustentable.
España, J. | Cisneros, E. | Solís, G.
- 169 Comportamiento térmico de cubiertas vegetadas como estrategia para aumentar la sustentabilidad de ciudades en zonas áridas.
Flores A., J. E. | Martínez, C. F. | Cantón, M. A. | Correa, E. N.
- 185 The central courtyard as an element of Green Urban Infrastructure and its effects in thermal comfort.
Fregoso L., S. C. | Lomas B., C. T. | Ordoñez L., E. E. | Cerón P., I. N. | Rodríguez A., A.
- 211 Oscilaciones Inter-Estacionales del perfil térmico. Efecto islas de calor urbano.
Fuentes P., C. A. | Celis F., D. | Lorenzo P., J. G.
- 229 Habitabilidad ambiental en la vivienda construida en serie para ciudades de México, con base en indicadores de beneficios, impactos sociales y calidad de vida.
García-Gómez, C. | Bojórquez M., G. | Peña B., L. | Pérez S., M. | Cerón, P. I.
- 251 Contradicciones entre sustentabilidad ambiental y segregación socio-espacial en condominios horizontales —estudio de caso— SÃO CARLOS/SP/BRASIL.
Gonçalves, L. M. | Ribeiro, R. A. | Rezek, S. F. | Lima, B. J.
- 263 El proyecto paisajístico como elemento integrador e identificador de técnicas compensatorias de drenaje.
Gonçalves, L. M. | Barbassa, A. P. | Pereira, T. R. D. S.
- 275 Reducción de movilidad a través del teletrabajo y su impacto ambiental en la ciudad de México.
Graizbord, B. | González Granillo, J. L. | López I., O.
- 283 Capacidad de carga urbana: Mérida.
Guerrero, T. | Ochoa, R. | Evia, D.
- 295 Habitabilidad y espacio público en Orizaba Veracruz.
Juárez R., J. L. | Sosa A., M. C.
- 313 La ciudad para todos: Urbanismo y Trabajo Comunitario.
López T., N. E.

- 325 La ciudad en los trayectos de los usuarios habituales de la periferia y el extrarradio. Caso de estudio: Mérida, Yucatán, 2011.
Lozano S.
- 327 Techos verdes productivos para todos.
Macías R., P. A. | López P., C. | Bolaños S., T.
- 349 Desempeño térmico. Análisis comparativo entre el parque metropolitano laguna del carpintero y el parque del canal de la cortadura.
Marín G., B. M. | Fuentes P., C. A. | Moreno C., L. C.
- 363 Sistemas agrícolas tradicionales en el contexto cubano para mitigar el cambio climático.
Martínez V., N. | Rivera L., R.
- 373 Precariedad urbana y sus dimensiones: El caso de la ciudad de Quetzaltenango, Guatemala.
Mauricio, S.
- 379 Sistema Tecno-Sustentable: Proyecto residencial en ciudad Madero, TAM.
Medellín V., J. | Cruz H., M. S.
- 395 Diseño de muebles con basura urbana.
Molar, M. | Iracheta, A. | Salas, G.
- 407 Reconocimiento de la biodiversidad urbana para la planeación territorial en contextos de crecimiento informal.
Montoya, J. | Bolaños, T.
- 419 Reutilización sustentable y conservación de la vivienda: Estudio de caso en Tampico, México.
Moreno C., L. C. | Fuentes P., C. A. | Lorenzo P., J. G.
- 429 Agricultura en edificios urbanos: Metodología para la implementación de invernaderos en azoteas de áreas no residenciales urbanas.
Nadal, A. | Pipia, L. | Alamús R. | Ruiz, A. | Cerón, I. | Cuerva, E. | Rieradevall, J. | Josa, A.
- 439 Comportamiento térmico de un invernadero integrado en azotea en una ciudad mediterránea. Resultados preliminares.
Nadal, A. | Cuerva, E. | Cerón, I. | Josa, A. | Rieradevall, J.
- 455 Una evaluación de la sustentabilidad urbana, caso de estudio: Hermosillo, Sonora.
Ojeda de la Cruz, A. | Álvarez C., C. R.

- 471 El papel del transporte en el marco analítico de la economía ecológica y la ecología política de cara a la construcción de ciudades verdes en México.
Ortiz L., F. N.
- 483 Movilidad urbana y tercera edad: accesibilidad y apropiación en una herramienta de apoyo a la toma de decisión.
Pedroso, E. | Rodrigues, C. | Itaborahy, I. | Santana, E. | Nascimento, B.
- 493 Diseño urbano sustentable, análisis socioespacial y ambiental de los conjuntos habitacionales en la región árida del norte de México.
Peña B., L. | Herrera T., L.
- 507 Propuesta integral para percepción de seguridad urbana desde el diseño del hábitat.
Rovelo, C.
- 527 Comportamiento higrotérmico y de la luz natural en espacios abiertos arbolados. Caso de estudio Mendoza, Argentina.
Ruiz, M. A. | Córica, L. | Correa, E.
- 545 Requerimientos y estrategias bioclimáticas para el diseño de espacios públicos exteriores: Mexicali, Baja California.
Urias-Barrera, H. | Bojórquez-Morales, G. | García C., R. | Luna-León, A.
- 561 Directorio de investigadores.

Comportamiento térmico de cubiertas vegetadas como estrategia para aumentar la sustentabilidad de ciudades en zonas áridas

Flores Asin, J. E.¹ | Martínez, C. F.¹ | Cantón, M. A.¹ | Correa, E. N.¹

RESUMEN

Las cubiertas vegetadas constituyen una estrategia de enverdecimiento que contribuye a mitigar el fenómeno de isla de calor a escala urbana y a disminuir las temperaturas en los espacios interiores a escala edilicia. Sin embargo, su implementación en zonas áridas del centro-oeste de Argentina está condicionada debido a que el recurso hídrico es escaso pero vital para garantizar un sistema sostenible y contribuir a la sustentabilidad del medio urbano-edilicio. Este trabajo evalúa el desempeño térmico de cubiertas vegetadas de tipo extensivo con cuatro especies vegetales que presentan distinto hábito de crecimiento, demanda hídrica y origen: *Nassella tenuissima* -nativa- y *Aptenia cordifolia*, *Sedum spectabile* y *Sedum lineare* -exóticas adaptadas a la región-. Persigue como objetivo identificar en el sistema de techos verdes, paquetes biológicos factibles de ser empleados a escala masiva en ciudades de zonas áridas que aporten además a la eficiencia energética en los espacios interiores. Metodológicamente, en box experimentales se desarrollan mediciones de variables meteorológicas -temperatura de aire exterior y de espacios interiores; temperatura y contenido de agua del sustrato; temperatura superficial de losas, entre otras. Las mismas se llevaron a cabo durante períodos de 24 días en la estación verano mediante la toma de datos con microadquisidores del tipo Onset-HOBO. Los resultados obtenidos demuestran que las cubiertas vegetadas permiten disminuir la temperatura media interior entre 0.9 y 2.1 °C y la temperatura máxima entre 5.4 a 6.4 °C de acuerdo a la especie vegetal que se utilice en el sistema. La reducción en la amplitud térmica interior promedio con la incorporación de esta tecnología es de 7.8 °C. Estos valores reflejan la eficiencia térmica de las cubiertas vegetadas evaluadas y su consecuente contribución al ahorro

¹ Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE). Centro Científico Tecnológico (CCT Mendoza). Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). C.P. 5500 – Mendoza, Argentina. E-mail: eflores@mendoza-conicet.gov.ar

energético de espacios interiores. Si bien se prevé ampliar el universo de análisis, el criterio de selección de especies apropiadas para estas estrategias deberá basarse principalmente en la menor demanda hídrica. De este modo, el uso racional de los recursos disponibles en contextos urbanos áridos favorecerá la sustentabilidad energética y ambiental.

Palabras clave: cubiertas vegetadas, desempeño térmico, ciudades de zonas áridas.

1. INTRODUCCIÓN

En las ciudades impacta tanto el microclima urbano, a través de las islas de calor urbanas, como el contexto climático global, ya que son un área de liberación de gas de efecto invernadero a la atmósfera debido a la calefacción, el aire acondicionado y el tráfico. La incorporación de vegetación en las ciudades es una estrategia de planificación que tiene posibles impactos positivos para ambas preocupaciones ^[1]. En las últimas décadas, el crecimiento urbano dificulta la disponibilidad de vacíos urbanos y en consecuencia es limitado el potencial de incorporación de estructuras verdes tradicionales. En ciudades consolidadas, nuevas tecnologías -cubiertas y muros verdes- permiten aumentar la relación territorial verde-construido.

Esta nueva tendencia en el planeamiento urbano constituye una alternativa viable que impacta tanto a escala urbana como edilicia. En la primera, reduce los efectos del calentamiento global y disminuye las temperaturas del espacio resultante de la articulación de la trama edilicia. En la segunda, es decir en los espacios interiores, reduce los consumos de energía derivados del acondicionamiento térmico para alcanzar condiciones de confort en la estación cálida ^[2].

A nivel internacional, numerosos autores han estudiado los beneficios de las cubiertas vegetadas asociados a la determinación de las temperaturas superficiales de las cubiertas vegetadas y, la temperatura del aire en espacios interiores y espacios urbanos mediatos con el objeto de determinar el impacto de los sistemas -conformados por distintas especies vegetales- en la demanda de energía para refrigeración ^[3,4,5]. Dichas investigaciones muestran que las cubiertas vegetadas pueden disminuir entre 60 y 90 % el flujo de calor a través del techo, entre 0.8 y 3 °C la temperatura interior ^[3,6,7] y generar ahorros de hasta el 40% de energía de refrigeración en edificios ^[8].

El alcance y la extensión de los beneficios varía en función del clima, la tecnología de la envolvente edilicia, la tipología de la cubierta verde y, la fisiología y morfología de la planta relacionada a la especie, que condiciona el mecanismo de enfriamiento preponderante -evapotranspiración o sombra-. ^[9]

En Argentina, el interés por estas tecnologías se ha incrementado a partir del año 2013 con la aprobación de la Ley N°4.428 en el ámbito de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, la cual tiene por objeto la implementación de "Techos o Terrazas Verdes". Desde entonces han surgido además de programas, documentos y aplicación en obras emblemáticas, empresas generadoras de esta tecnología con aplicación en obra y uso de materiales utilizados en otros países. Sin

embargo, su implementación requiere evaluar el desempeño térmico del sistema en relación a las distintas zonas climáticas que caracterizan a la región.

En la provincia de Mendoza, ubicada en el centro oeste de la Argentina, el ambiente físico está caracterizado por la aridez y en consecuencia el recurso hídrico es escaso (Índice de aridez=1.87; Precipitación anual 200mm). El crecimiento sostenido de la ciudad y su densificación en los últimos años no ha sido acompañado de un proceso de densificación de los espacios verdes, no disponiendo en la actualidad de vacíos urbanos para la inserción en la trama de estructuras verdes tradicionales. Por otra parte, la ciudad dispone en las áreas de mayor demanda de espacios verdes -alta densidad edilicia- de un elevado porcentaje de cubiertas planas -60%- potencialmente aptas para la implementación de tecnologías verdes ^[10]. Sin embargo, su incorporación masiva requiere del diseño y evaluación de sistemas de naturación extensivo bajo las condicionantes que las ciudades de zonas áridas imponen, en particular la restricción hídrica. Esto implica evaluar la eficacia y eficiencia de los sistemas asociados a especies de bajo consumo de un recurso escaso, pero vital para garantizar la permanencia en el tiempo de las áreas verdes.

Este trabajo evalúa el comportamiento térmico de cubiertas vegetadas con especies que presentan distinta morfología y demanda hídrica con el objeto de identificar paquetes biológicos factibles de ser empleados como estrategia de acondicionamiento natural de espacios interiores en ciudades de zonas áridas.

2. METODOLOGÍA

Con el fin de estudiar el efecto de techos verdes en el comportamiento térmico de espacios interiores se realizó una investigación de tipo experimental, de acuerdo a la metodología propuesta por La Roche ^[5] para climas cálidos secos, la cual consiste en el desarrollo y monitoreo térmico de ensayos en condiciones controladas.

2.1. Diseño experimental

El diseño experimental tiene por objeto analizar en forma comparativa la influencia de cubiertas verdes adaptadas a condicionantes locales, respecto a cubiertas tradicionales, en el comportamiento térmico de espacios interiores. A tal fin, se montaron tres box de ensayo en el área experimental del CCT CONICET Mendoza (latitud 32°53'52.83"S, longitud 68°52'31.30"O). La cantidad de box de ensayos persigue comparar sistemas verdes con distintos paquetes biológicos, respecto a cubiertas tradicionales (box testigo).

Los box de ensayos conforman volúmenes ciegos de 1 m³, de carácter liviano y aislado al exterior. Tecnológicamente, muros y pisos están compuestos por tres capas: placa cementicia en la cara interior (espesor 10 mm), aislación térmica de poliestireno expandido de baja densidad (espesor 50 mm) y placa de fenólico en la cara exterior (espesor 18 mm), acabado esmalte sintético color blanco. La cubierta es de hormigón armado (espesor 150 mm; peso específico 2400 Kg/m³; dosificación en volumen: 1-3-3 cemento, árido grueso y fino, aislada hidráulicamente (membrana Sika® Sarnafil F 610-12 Felt). La misma, tiene por objeto evaluar el tipo

constructivo comúnmente empleado en la resolución de techos en el parque edilicio del Área Metropolitana Mendoza (AMM).

La tecnología verde están definida por dos capas: una capa material (manto drenante Sika® GR Aquadrain Extensivo y sistema de riego por goteo subsuperficial) y una capa biológica. Esta última está compuesta por sacos de geotextil⁽³⁾ contenedores del sustrato (arena, orujo agotado y turba negra en iguales proporciones; espesor 150 mm) y especies vegetales.

Este trabajo evalúa cuatro especies de disponibilidad local y alta tasa de reproducción agámica: *Aptenia cordifolia* (L. f.) Schwant. "Baby rose", *Sedum spectabile* (Boreau) H. Ohba "Sedum otoño", *Sedum lineare* Thunb. (=S. anhuiense S. H. Fu & X. W. Wang) y *Nassella tenuissima* (Trin.) Barkworth Bas. La selección de especies se sustenta en la comparación de distintos paquetes biológicos -con especies de diferente origen, poder tapizante, consumo hídrico y hábito de crecimiento- en el comportamiento térmico de las tecnologías verdes en sí mismas y de los espacios interiores conexos.

La figura 1 muestra el diseño experimental y la tabla 1, las características descriptivas de las especies evaluadas.

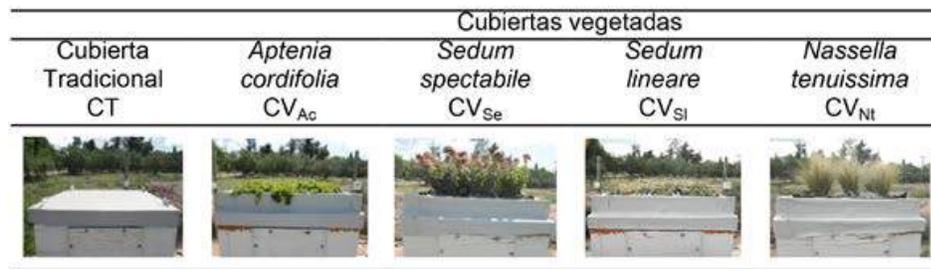


Figura 1. Diseño Experimental.

Tabla 1. Características de las especies vegetales evaluadas

Especie	<i>Aptenia cordifolia</i>	<i>Sedum spectabile</i>	<i>Sedum lineare</i>	<i>Nassella tenuissima</i>
Característica				
Origen respecto a Argentina	Exótica	Exótica	Exótica	Nativa
Cobertura vegetal (%)	76	79	48	50
Consumo hídrico (litros. m ² /año)	268	291	284	295
Hábito de crecimiento	Rastrero	Erguida	Rastrero	Erguida

2.2. Método de medición

El comportamiento térmico de las tecnologías verdes en sí mismas y de los espacios interiores se evaluó a partir del registro de variables meteorológicas (temperatura de aire, temperatura y contenido de agua del sustrato, y temperatura superficial de la losa), en la estación de verano durante ciclos de medición de 24 días. Los datos se registraron cada 15 minutos bajo la siguiente configuración: cinco microadquisidores de datos por box de tratamiento con cubierta vegetada, tres microadquisidores en el box de tratamiento testigo y un sensor de referencia en el espacio abierto.

Los sensores localizados en los box de tratamientos con cubierta vegetada se distribuyen de la siguiente manera:

- Un sensor en el espacio interior del tipo Onset® HOBO® temp/RH logger UX100-003 fijo.
- Dos sensores en la losa de hormigón en la cara interna y externa, del tipo termocupa T EL-USB-TC con data logger incluido en cada una.
- Dos sensores en el sustrato del tipo Onset® HOBO® SoilMoisture EC5 S-SMC-M005 y del tipo Onset® HOBO® 12-bit Temp Sensor S-TMB-M002, ambos asociados a un data logger tipo HOBO® U30.

El box testigo repite la misma configuración respecto a la distribución de sensores en el espacio interior y en la losa de hormigón. La ubicación de los sensores se determinó en función de un conjunto de ensayos dirigidos a determinar la posición más representativa respecto a la variable a medir y evitar la influencia de factores externos sobre la misma. La figura 2 muestra la configuración del método de medición en los box de experimentación, además del instrumental de medición.

Los sensores del tipo Onset® HOBO® SoilMoisture EC5 S-SMC-M005 se calibraron en laboratorio en aire y con agua destilada a temperatura ambiente (25 °C) de acuerdo a las recomendaciones del fabricante, encontrándose en el rango de funcionalidad normal (aire: -0.193 a -0.139 m³/m³, agua: +0.521 a +0.557 m³/m³). Los sensores del tipo Onset® HOBO® 12-bit Temp Sensor S-TMB-M002 fueron calibrados con salto de escalón térmico en laboratorio en condiciones controladas con baño termostático a 64 °C y a temperatura de fusión de agua destilada 0 °C. El comportamiento fue uniforme y mostraron igual sensibilidad al enfriamiento y al calentamiento. Los desvíos se encontraron en un rango de ± 3.00 % respecto de la media general (rango de temperaturas del fabricante: -40 a 75 °C).

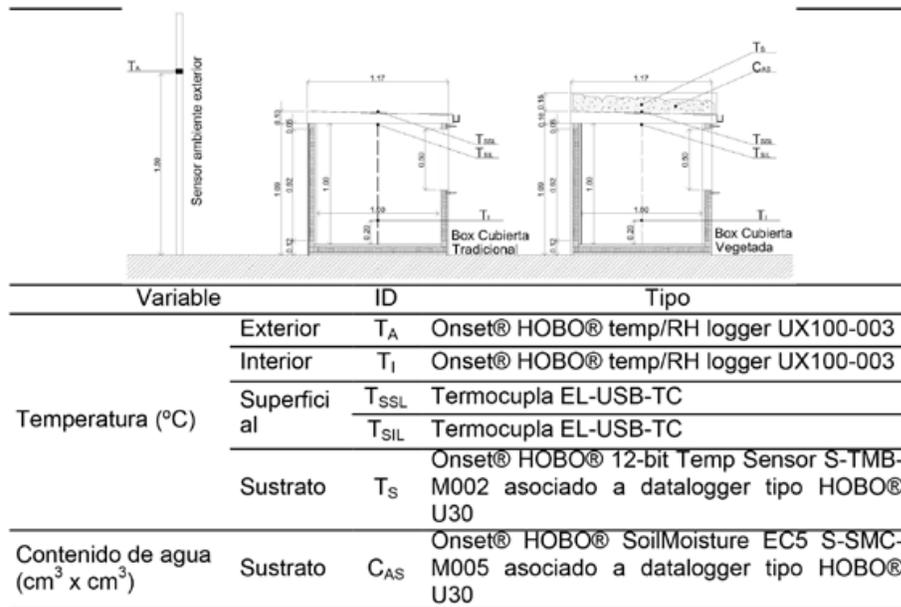


Figura 2: Método de medición e instrumental utilizado.

En el ambiente exterior se midió radiación solar total (W/m²) con un piranómetro del tipo Star Pyranometer Mod3040-A Weather Tronic y velocidad de viento (km/h) con un anemómetro del tipo Micro Response Anemometer Mod 2030 Weather Tronic. El almacenamiento de datos de ambos sensores en la Plataforma Adquisidora de Datos se realizó en una memoria flash del tipo Secure Digital (SD).

Se realizaron ciclos de medición de 24 días comparando dos cubiertas vegetadas distintas con una cubierta tradicional en forma contemporánea, cumplido el ciclo se rotaron las especies y comenzó un nuevo ciclo.

3. RESULTADOS

Se presentan los resultados para dos ciclos de medición en la estación de verano:

- 1er ciclo de medición: Cubierta vegetada con *Aptenia cordifolia* -CVAc-, *Sedum spectabile* -CVSe- y cubierta tradicional -CT-.
- 2do ciclo de medición: Cubierta vegetada con *Sedum lineare* -CVSl-, *Nassella tenuissima* -CVNt- y cubierta tradicional -CT-.

3.1. Primer ciclo de medición: cubierta vegetada con *aptenia cordifolia*, *sedum spectabile* y cubierta tradicional

Los datos obtenidos de las mediciones fueron promediados en forma horaria. La curva de temperatura exterior (figura 3), en el periodo monitoreado, muestra un comportamiento inestable

con diferencias en las temperaturas máximas y mínimas del orden de los 11°C (máximas -20.6 a 36.8°C- y mínimas -11.2°C a 22.6°C-).

A los efectos de tomar como unidad de estudio un día típico de verano, se compararon los datos medidos con los datos medios históricos para la serie temporal 1983-2014 correspondientes a la estación meteorológica CCT CONICET - Mendoza (32°53'52.83"S, 68°52'31.30"O)²

La contrastación de datos permitió seleccionar el día 23 de febrero con una diferencia en la temperatura media de 1.2°C respecto a los datos medios históricos. Para dicho día se consideró el rango horario de 24 horas, comenzando a las 20:00hs. El día elegido presenta condiciones de asoleamiento en días previos (figura 3).

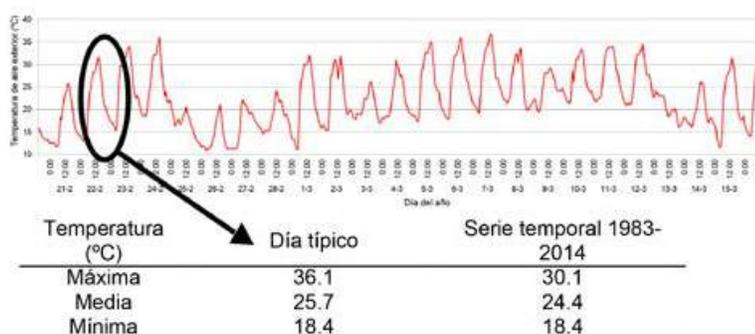


Figura 3. Periodo medido. Datos de verano del día típico y de la serie temporal 1983-2014.

Los resultados se presentan en función de evaluar comparativamente las distintas variables para los tratamientos planteados mediante análisis térmico.

Los resultados obtenidos se analizan en forma comparativa para los tres tratamientos -CT, CVAc y CVSe- en torno a la influencia de las mismas en la temperatura del aire del espacio interior, temperatura superficial de la losa y, temperatura y contenido de agua del sustrato.

Espacio interior

Temperatura del aire

La figura 4 muestra el comportamiento de la temperatura exterior y la del aire interior en cada uno de los tratamientos. Se observa un retardo entre las temperaturas máximas y mínimas en el interior de cada uno de los tratamientos con cubiertas vegetadas respecto a la temperatura exterior equivalente a 3 horas durante el calentamiento y a 5 horas durante el enfriamiento, lo cual evidencia el efecto de la tecnología verde en la temperatura interior.

² CRISTALDO, Julio. Recopilación y tratamiento de datos meteorológicos mensuales y anuales. Período 1983-2015. Estación Meteorológica CCT Conicet - Mendoza. Argentina.

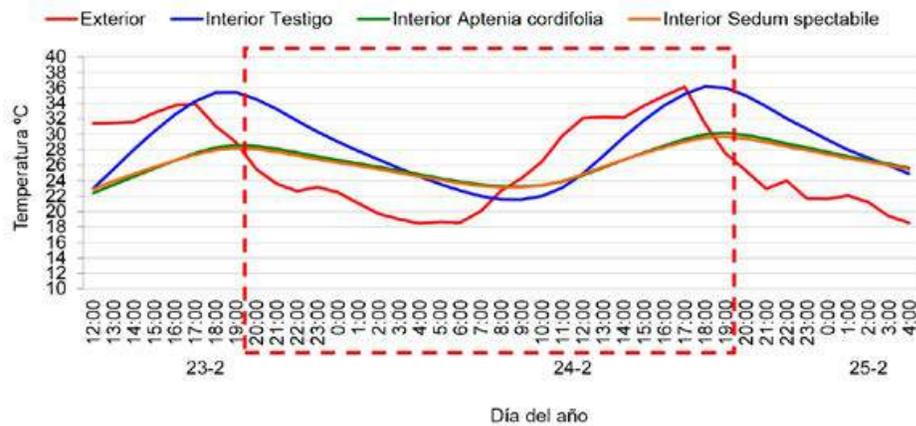


Figura 4. Comportamiento térmico del espacio interior.

Es notable la diferencia de la amplitud térmica entre el exterior y el interior de cada uno de los tratamientos. Su valor es superior a 3°C en CT y alcanza una diferencia de 10 a 11°C en los tratamientos con cubiertas vegetadas (tabla 2).

Al considerar la magnitud del retardo y el valor de la temperatura interior entre los picos y valles de las curvas, se presentan diferencias que manifiestan el efecto particular de las cubiertas vegetadas respecto de la temperatura interior del CT. Mientras la amplitud térmica de la temperatura interior en los tratamientos con cubierta vegetada está atenuada -6 a 7°C-; se aprecia una diferencia importante respecto a la amplitud térmica de la temperatura interior del CT -14°C- y respecto a la del ambiente -17°C- (tabla 2).

Tabla 2. Temperatura y amplitud térmica.

Temperatura (°C)	Exterior	Interior		
		CT	CV _{Ac}	CV _{Se}
Mínima	18.4	21.5	23.2	23.1
Media	25.7	28.1	26.2	26.0
Máxima	36.1	36.1	30.1	29.7
Amplitud térmica	17.7	14.6	06.9	06.6

La temperatura media interior del box testigo es 2.5°C superior a la media exterior y las temperaturas medias de los box con cubierta vegetada son semejantes entre sí y a la exterior, pero inferiores respecto al CT en un rango de 1.9-2.1°C (tabla 2).

La temperatura máxima en el interior del CT es igual a la exterior, en cambio en los tratamientos con cubierta vegetada, la temperatura máxima interior se encuentra 6.0°C por debajo de la interior del CT para CV_{Ac} y 6.5°C para CV_{Se} (tabla 2).

Al comparar los dos tratamientos con cubierta vegetada, se observa que las mayores temperaturas se dan en CV_{Ac}, aunque las diferencias entre valores medios, mínimos, máximos y amplitud térmica, son despreciables y del orden de 0.2°C, 0.1°C, 0.5°C y 0.4°C respectivamente (tabla 2).

Losa

Temperatura superficial

La curva de la temperatura superficial en la cara exterior de la losa, en CT, muestra un comportamiento similar a la temperatura exterior con un desfase horario de una hora tanto en el periodo de enfriamiento (desde las 20:00 hs hasta las 07:00 hs) como en el periodo de calentamiento (desde las 07:00 hs hasta las 20:00hs). Alcanza una temperatura máxima de 35.3°C y una mínima de 18.6°C. La cara inferior presenta mayores temperaturas respecto a la cara superior, alcanzando un valor máximo de 39.3°C y un mínimo de 21.9°C. Las mayores temperaturas inferiores resultan del efecto combinado de la ganancia térmica y la inercia de la envolvente paramentos verticales y horizontales- (figura 5).

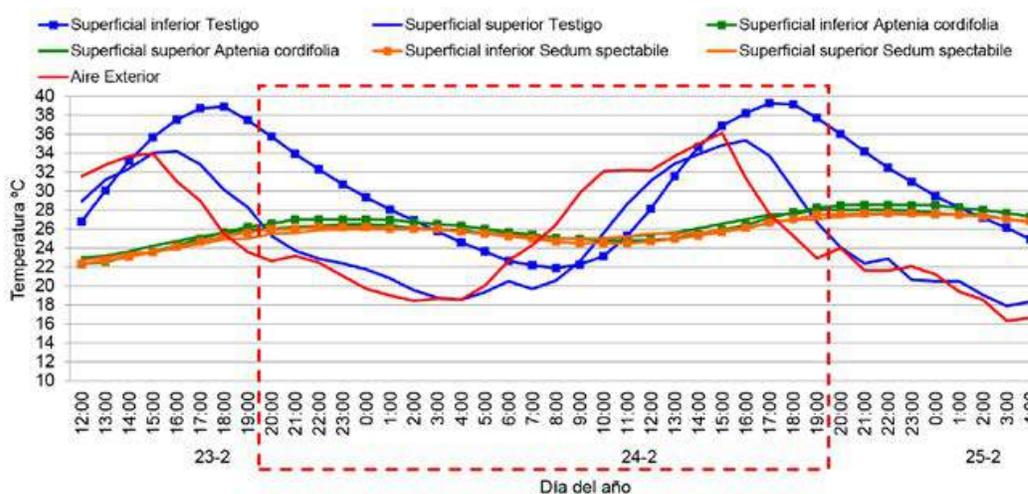


Figura 5. Temperatura superficial de la losa.

Las temperaturas en las caras superior e inferior de la losa en los tratamientos con cubierta vegetal son significativamente menores a los alcanzados en CT, semejantes entre sí y homogéneas. Alcanzan temperaturas que oscilan entre 22°C y 29°C (amplitud térmica 7°C). El comportamiento térmico en CVAc presenta temperaturas máximas superficiales levemente mayores en la cara superior de la losa (26.5°C) respecto al CVSe (26.0°C) y semejantes en las temperaturas mínimas (25.0°C). Esta leve diferencia en las temperaturas máximas se debe a las características intrínsecas de las especies vegetales en estudio (figura 5). Las temperaturas superficiales de la cara inferior de la losa son mayores a las de la superior en el periodo de enfriamiento (de 21:00hs a 12:00hs) y menores en el periodo de calentamiento (de 12:00hs a 21:00hs). Al igual que en el tratamiento testigo, este comportamiento se debe al efecto de la ganancia térmica y la inercia de la losa de hormigón (figura 5).

Sustrato

Temperatura del sustrato (figura 6)

La temperatura exterior oscila en un rango de 25.7°C, con un máximo de 36.1°C y un mínimo de 18.4°C. La temperatura de sustrato presenta una amplitud térmica de 5.2°C para CVAc (máx. 28.5°C y mín 23.3°C) y de 2.6°C para CVSe (máx. 26.1°C y mín 23.5°C). La máxima de la temperatura exterior se presenta en forma desfasada con el valor máximo de radiación solar. Sin embargo la temperatura máxima del sustrato coincide con la máxima de la temperatura exterior. Las magnitudes se encuentran atenuadas 10.0°C para CVSe y 7.6°C para CVAc. Estos comportamientos evidencian la capacidad del paquete biológico de regular la temperatura exterior.

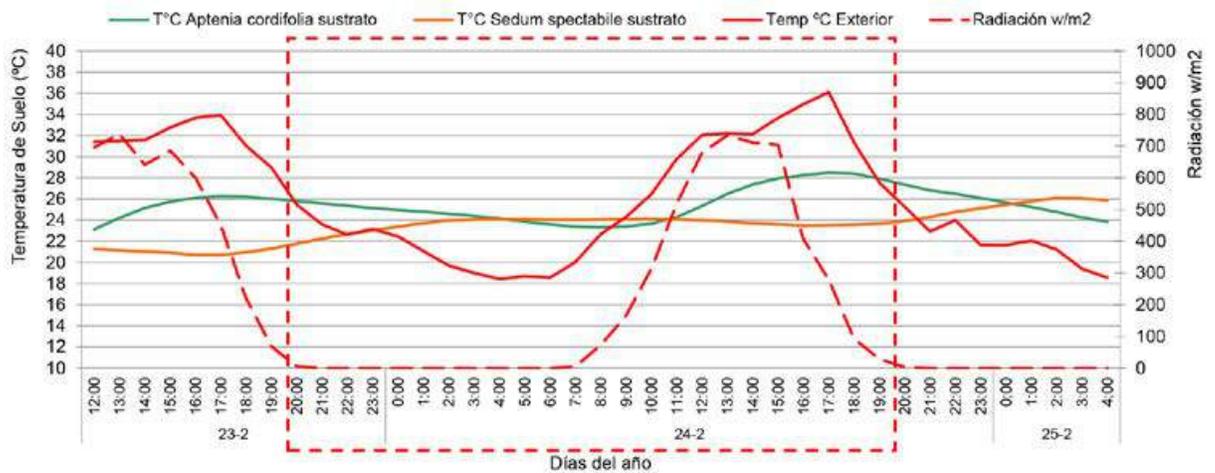


Figura 6. Temperatura del sustrato.

3.2. Segundo ciclo de medición: cubierta vegetada con sedum lineare, nassella tenuissima y cubierta tradicional

Los datos obtenidos de las mediciones fueron promediados en forma horaria. La curva de temperatura exterior (figura 7), en el periodo monitoreado, muestra un comportamiento inestable con diferencias en las temperaturas máximas del orden de los 26°C (máximas -10.8 a 36.6°C-) y en las mínimas del orden de los 13°C (-7.8°C a 20.7°C-).

Al igual que en el primer ciclo de medición a los efectos de tomar como unidad de estudio un día típico de verano, se compararon los datos medidos con los datos medios históricos para la serie temporal 1983-2014 correspondientes a la estación meteorológica CCT CONICET - Mendoza.

La contrastación de datos permitió seleccionar el día 19 de marzo con una diferencia en la temperatura media de 2.1°C respecto a los datos medios históricos. Para dicho día se consideró el rango horario de 24 horas, comenzando a las 20:00hs. El día elegido presenta condiciones de asoleamiento en días previos (figura 7)

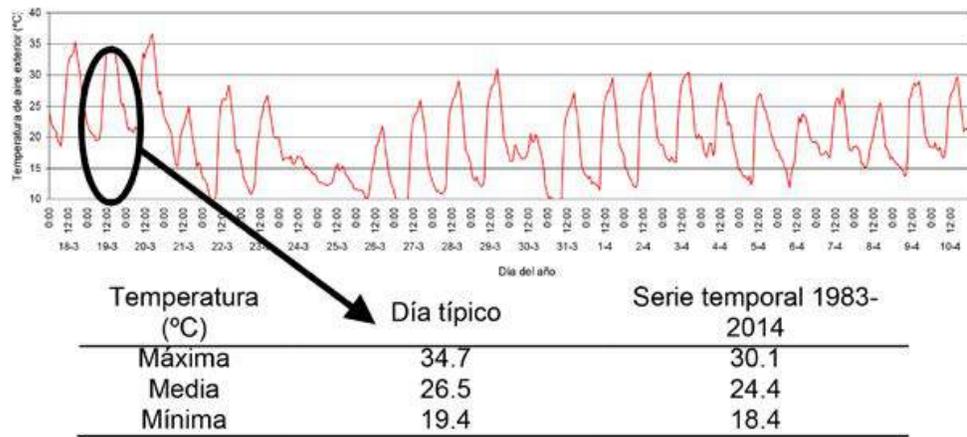


Figura 7. Periodo medido. Datos de verano del día típico y de la serie temporal 1983-2014.

Los resultados obtenidos se analizan en forma comparativa para los tres tratamientos -CT, CVSI y CVNt- en torno a la influencia de las mismas en la temperatura del aire del espacio interior, temperatura superficial de la losa y, temperatura y contenido de agua del sustrato.

Espacio interior

Temperatura del aire

La figura 8 muestra el comportamiento de la temperatura exterior y la del aire interior en cada uno de los tratamientos. Se observa un retardo entre las temperaturas máximas y mínimas en el interior de cada uno de los tratamientos con cubiertas vegetadas respecto a la temperatura exterior equivalente a 3 horas durante el calentamiento y a 5 horas durante el enfriamiento, lo cual evidencia el efecto de la tecnología verde en la temperatura interior.

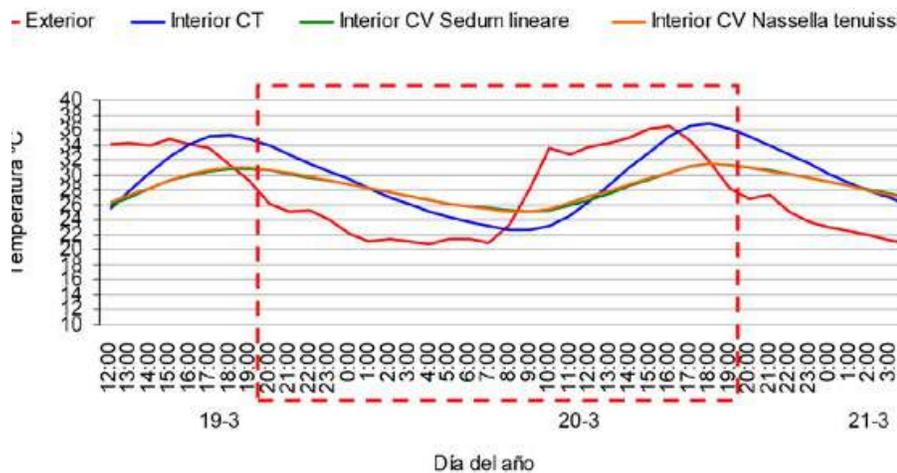


Figura 8. Comportamiento térmico del espacio interior.

Es notable la diferencia de la amplitud térmica entre el exterior y el interior de cada uno de los tratamientos. Su valor es superior a 1.6°C en CT y alcanza una diferencia de 9.5°C en los tratamientos con cubiertas vegetadas (tabla 3).

Al considerar la magnitud del retardo y el valor de la temperatura interior entre los picos y valles de las curvas, se presentan diferencias que manifiestan el efecto particular de las cubiertas vegetadas respecto de la temperatura interior del CT. Mientras la amplitud térmica de la temperatura interior en los tratamientos con cubierta vegetada está atenuada -6,4°C-; se aprecia una diferencia importante respecto a la amplitud térmica de la temperatura interior del CT -14.3°C- y respecto a la del ambiente -15.9°C- (tabla 3).

Tabla 3. Temperatura y amplitud térmica.

Temperatura (°C)	Exterior	Interior		
		CT	CV _{Sl}	CV _{Nt}
Mínima	20.7	22.6	25.1	25.0
Media	27.5	29.0	28.1	28.1
Máxima	36.6	36.9	31.5	31.5
Amplitud térmica	15.9	14.3	06.4	06.4

La temperatura media interior del box testigo es 1.5°C superior a la media exterior y las temperaturas medias de los box con cubierta vegetada son semejantes entre sí y levemente superiores a la exterior (0.6°C) e inferiores respecto al CT en 0.9°C (tabla 3).

La temperatura máxima en el interior del CT es semejante a la exterior, en cambio en ambos tratamientos con cubierta vegetada, la temperatura máxima interior se encuentra 5.4°C por debajo de la interior del CT (tabla 3).

Al comparar los dos tratamientos con cubierta vegetada, se observa que no hay diferencias entre valores medios, mínimos, máximos y amplitud térmica (tabla 3).

Losa

Temperatura superficial

La curva de la temperatura superficial en la cara exterior de la losa, en CT, muestra un comportamiento similar a la temperatura exterior con un desfasaje horario de alrededor de una hora tanto en el periodo de enfriamiento como en el periodo de calentamiento. Alcanza una temperatura máxima de 40.0°C y una mínima de 22.6°C. La cara inferior presenta menores temperaturas respecto a la cara superior, alcanzando un valor máximo de 38.2°C y un mínimo de 19.4°C (figura 9).

Las temperaturas en las caras superior e inferior de la losa en los tratamientos con cubierta vegetada son significativamente menores a los alcanzados en CT, semejantes entre sí y homogéneas. Alcanzan temperaturas que oscilan entre 26°C y 30°C (amplitud térmica 7°C) (figura 9).

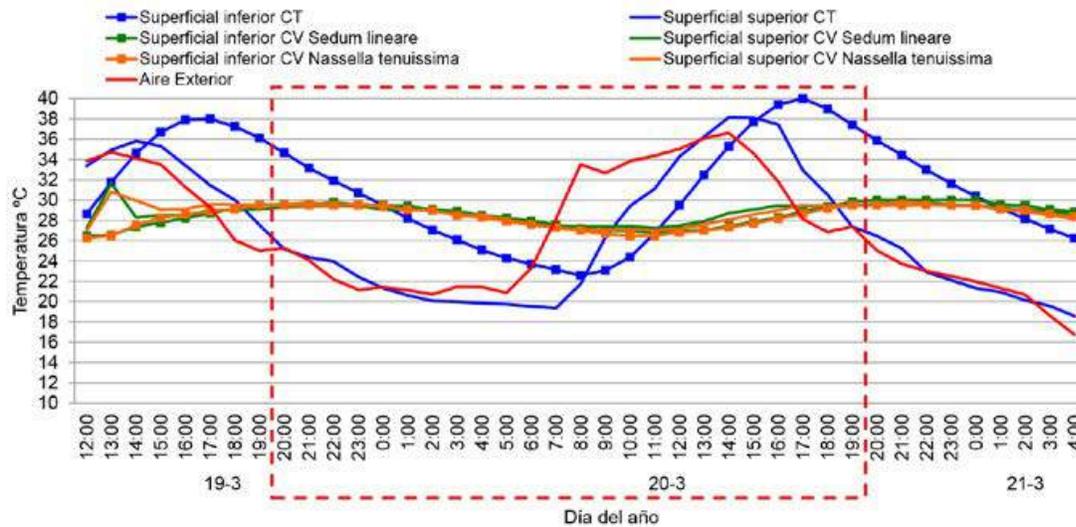


Figura 9. Temperatura superficial de la losa.

Las temperaturas superficiales de la cara inferior de la losa son levemente mayores a las de la superior en el periodo de enfriamiento y menores en el periodo de calentamiento. Al igual que en el tratamiento testigo, este comportamiento se debe al efecto de la ganancia térmica y la inercia de la losa de hormigón (figura 9).

Sustrato

Temperatura del sustrato

La temperatura exterior oscila en un rango de 19.4°C, con un máximo de 34.7°C y un mínimo de 19.4°C. La temperatura de sustrato presenta una amplitud térmica de 5.3°C para CVSl (máx. 30.1°C y mín. 24.8°C) y de 5.2°C para CVNt (máx. 29.9°C y mín. 24.7°C). La máxima de la temperatura exterior se presenta en forma desfasada con el valor máximo de radiación solar. Las temperaturas máximas del sustrato para ambas cubiertas vegetadas ocurre una hora después de la exterior. Las magnitudes de atenuación de la máxima temperatura exterior en el sustrato es de 4.6°C para CVSl y 4.8°C para CVNt. Estos comportamientos ponen en relevancia la capacidad de regular la temperatura exterior del paquete biológico (figura 10).

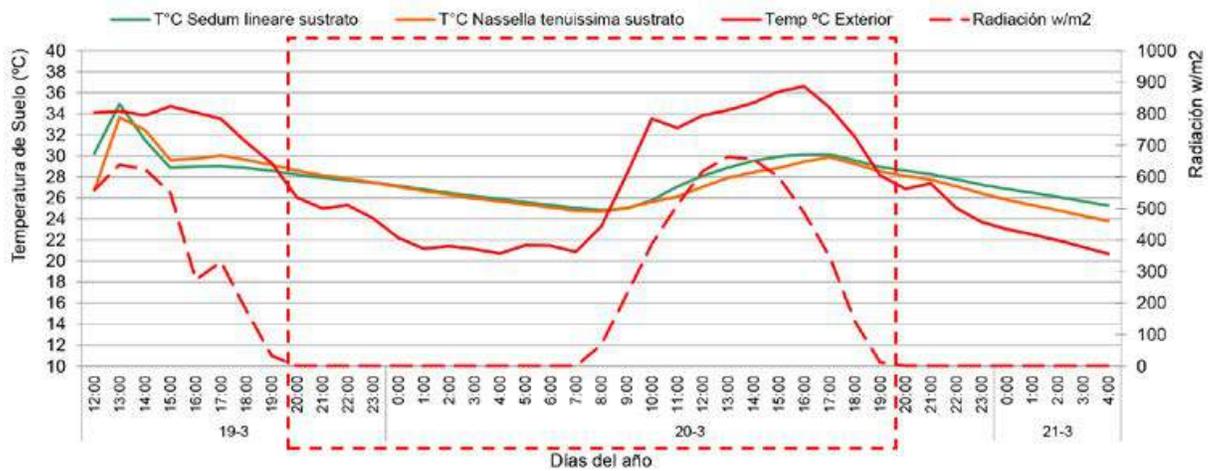


Figura 10. Temperatura del sustrato.

4. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos mediante los ensayos experimentales se puede concluir, que en un día típico de verano el uso de tecnologías verdes sobre techos planos, permite disminuir la amplitud térmica interior alrededor de 8°C y la temperatura máxima en más de 5°C. El mismo efecto se observa en la temperatura media interior, con una disminución de 1 a 2°C con el uso de cubiertas vegetadas respecto a un techo tradicional sin vegetar, dependiendo del paquete biológico que se utilice en la cubierta.

La disminución de la temperatura en espacios interiores contribuye a moderar los consumos de energía en el ambiente construido. Estudios previos muestran que en espacios interiores conexos a la cubierta vegetada, variaciones de temperatura de 1.5 a 1.6 °C generarían ahorros de energía eléctrica destinada a refrigeración del orden del 32% al 34%. Esto implica que, pequeñas diferencias de temperatura generan un alto impacto en la demanda energética para el acondicionamiento térmico de espacios interiores ^[11].

Los comportamientos térmicos entre los box de ensayo con diferentes especies vegetales -*Sedum spectabile*, *Aptenia cordifolia*, *Sedum lineare*, *Nassella tenuissima*- muestran diferencias poco significativas. Las temperaturas máximas alcanzadas en el interior de los box difieren como máximo 0.5°C, dependiendo del ciclo de medición que se observe. Esto implica que es necesario ampliar el universo de especies en estudio para identificar mayores rangos de eficiencia. Además, el criterio de selección de especies en zonas áridas debe asociarse principalmente a la demanda hídrica y la disponibilidad local. Si bien las comúnmente utilizadas en cubiertas vegetadas a nivel internacional pertenecen en su mayoría al género *Sedum*; bajo condiciones de clima árido la tendencia de uso debiera orientarse a especies nativas o adaptadas para asegurar la cobertura vegetal [12]. En este sentido es pertinente atender al uso de especies vegetales adaptadas al clima y de disponibilidad regional, como es el caso de *Aptenia cordifolia* (268 litros.m²/año). La especie *Nassella tenuissima*, de origen local, en el periodo estudiado no mostró un comportamiento diferencial con respecto a las demás especies y presentó el mayor

consumo hídrico de las cuatro cubiertas vegetadas. Esto último deja de manifiesto la importancia de probar diferentes cuotas de riego en las especies evaluadas, de modo de seleccionar aquellas que se adapten a restricciones hídricas y de este modo colaboren a la sostenibilidad del sistema en zonas áridas y al uso más eficiente del recurso agua, limitante mismas.

La temperatura superficial en la cara externa de las losas en los box con tecnologías verdes muestra condiciones de estabilidad, siendo su amplitud térmica de 10 a 13°C menor respecto a la cubierta tradicional. La temperatura máxima superficial es del orden de 40°C en el box testigo y de 30°C en los box con cubiertas vegetadas. Desde el punto de vista tecnológico, la reducción de la amplitud térmica representa un beneficio asociado al aumento de la vida útil de la aislación hidráulica debido a su exposición a condiciones térmicas más favorables [13].

Los resultados alcanzados respecto a la temperatura del sustrato dejan de manifiesto que el paquete biológico en un día representativo de verano se comporta como un aislante, disminuyendo las temperaturas máximas exteriores a nivel de sustrato en más de 5°C y la amplitud térmica en más de 10°C con respecto a la exterior.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICET) y a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCYT) la financiación recibida para el desarrollo de esta investigación. Así también a la firma SIKA ARGENTINA y SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS S.A. por sus contribuciones al desarrollo de ensayos experimentales.

6. REFERENCIAS

1. Lemonsu, A., Masson, V., Shashua-Bar, L., Erell, E., and Pearlmutter, D. (2012). Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance model for modelling urban green areas, *Geosci. Model Dev.*, 5, 1377-1393, doi:10.5194/gmd-5-1377-2012.
2. Alexandri, E. y Jones, P. 2006. Temperature decreases in as urban canyon due to green walls and green roof in diverse climates. *Building and Environment-Elsevier*, n° 43, pp.480-493.
3. Figueroa, M. y Schiler M. 2009. Green Roof Performance: Passive design implications in Los Angeles, California. En: PLEA2009 (22-24 June 2009) - 26th Conference on Passive and Low Energy Architecture. Quebec City, Canada.
4. Santamouris M. (2012). Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation Technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy-Elsevier*, n° 103, pp. 682-703.
5. La Roche, P. (2009). Low Cost Green Roofs for Cooling: Experimental series in a hot and dry climate. En: PLEA2009 (22-24 June 2009) - 26th Conference on Passive and Low Energy Architecture. Quebec City, Canada.

6. Savio, P., Rosenzweig C., Solecki W. D. y Slosberg, R. B. (2006). Mitigating New York City's Heat Island with Urban Forestry, Living Roofs, and Light Surfaces. New York City Regional Heat Island Initiative. The New York State Energy Research and Development Authority, Albany, NY.
7. Qiu G., Li H., Zhang Q., Chen W., Liang X. y Li X. (2013). Effects of Evapotranspiration on Mitigation of Urban Temperature by Vegetation and Urban Agriculture. *Journal of Integrative Agriculture*, n° 12, pp. 1307-1315.
8. Zinzi M. y Agnoli S. (2012). Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region. *Energy and Buildings-Elsevier*, n° 55, pp. 66-76.
9. Cameron R. W. F., Taylor J. E. y Emmett M. R. (2014). What's 'cool' in the world of green façades? How plant choice influences the cooling properties of green walls. *Building and Environment*, n° 73, pp. 198-207.
10. Flores Asin J. E., Martínez C. F. y Cantón M. A. (2013). Tecnologías verdes. Potencial de aplicación en el área metropolitana de MENDOZA (AMM). En: Acta de la XXXVI Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente (22 al 25 de Octubre de 2013). Tucumán, Argentina.
11. Flores Asin, J. E., Martínez, C. F.; Cantón, M. A. y Correa E. N. (2015). Impacto de cubiertas vegetadas en el ahorro energético del parque edilicio del área metropolitana de Mendoza (AMM). En: Acta de la XXXVIII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente (10 al 13 de Noviembre de 2015). Mendoza, Argentina.
12. Klein, P. M. y Coffman R. (2015). Establishment and performance of an experimental green roof under extreme climatic conditions. *Science of the Total Environment-Elsevier*, n° 512-213, pp. 82-93.
13. Jaffal, I., Ouldboukhitine S. y Belarbi R. (2012). A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. *Renewable Energy-Elsevier*, n° 43, pp. 157-164.

IMPACTO DE CUBIERTAS VEGETADAS EN EL AHORRO ENERGÉTICO DEL PARQUE EDIFICIO DEL ÁREA METROPOLITANA DE MENDOZA (AMM).

J. Emiliano Flores Asin¹, Claudia F. Martinez², M. Alicia Cantón³, Erica N. Correa²
Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda - Instituto Ciencias Humanas Sociales y Ambientales
(LAHV INCIHUSA). Centro Científico Tecnológico (CCT Mendoza). Consejo Nacional de
Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). C.P. 5500 – Mendoza
Tel. 0261-5244310. Fax 0261-5244001. E-mail: eflores@mendoza-conicet.gov.ar

Recibido 02/09/15, aceptado 06/10/15

RESUMEN: Las cubiertas vegetadas constituyen una estrategia de enverdecimiento urbano que contribuye a reducir los efectos del calentamiento global, disminuyendo las temperaturas urbanas y los consumos de energía en espacios interiores. Este trabajo evalúa a partir de ensayos experimentales, el efecto de cubiertas vegetadas en zonas de clima cálido-seco sobre el comportamiento térmico de espacios interiores y su consecuente ahorro energético. A tal fin se desarrollaron mediciones de temperatura de aire en box experimentales, mediante sensores del tipo Onset-HOBO, en la estación verano 2015. Los resultados indican que en espacios interiores conexos a la cubierta vegetada, variaciones de temperatura de 1.5 a 1.6 °C generarían ahorros de energía eléctrica destinada a refrigeración del orden del 32% al 34%. La experimentación de estas nuevas tecnologías verdes a nivel regional es importante para lograr su adecuada implementación en el marco de un ahorro energético y un uso racional de los recursos disponibles.

Palabras clave: Cubiertas vegetadas, Comportamiento térmico, Ahorro energético, Zonas áridas.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo sustentable implica considerar la disponibilidad energética presente y contar con un horizonte de abastecimiento energético confiable que considere los incrementos en la demanda de energía que plantea una economía en crecimiento. En la actualidad el desarrollo de un país está estrictamente ligado a la energía disponible para desarrollar sus actividades productivas, de construcción de infraestructuras y de transporte, entre otras necesidades de la vida moderna. En este marco, la eficiencia energética es considerada un componente imprescindible para la política energética y la preservación del ambiente.

La aplicación de políticas de uso eficiente de la energía en los distintos sectores tiene suma relevancia en un contexto de aumento de su demanda debido al crecimiento económico e industrial y a mayores exigencias de habitabilidad (Rosenfeld *et al.*, 2007; Cárdenas, 2011). Implementar estrategias que reduzcan los consumos energéticos es un desafío para el presente siglo.

A nivel urbano los problemas ambientales son graves. Si bien la necesidad de la vegetación en entornos construidos va en aumento, la densificación de las ciudades provoca la pérdida de áreas verdes tradicionales. Esta situación favorece el efecto isla de calor urbano (ICU), propicia aumentos de temperaturas, altos consumos energéticos para refrigeración y causa condiciones de discomfort para el

¹ Becario Inicial ANPCYT

² Investigadora Adjunta CONICET

³ Investigadora Independiente CONICET

habitante urbano (Giridharan *et al.*, 2005; Permpituck y Namprakai, 2012). Controlar y reducir la carga térmica en el interior de edificios es imprescindible para alcanzar condiciones de confort térmico y un ahorro de energía significativo. Las estrategias disponibles abarcan el uso de equipos mecánicos de acondicionamiento de aire que son grandes consumidores de energía o bien factores ambientales como la vegetación que no implica un gasto energético.

Las nuevas tecnologías verdes se presentan como estrategias apropiadas que han sido aceptadas como una opción viable para aumentar las áreas verdes en entornos consolidados, reducir el consumo de energía en la edificación y aumentar el confort térmico. Las cubiertas vegetadas se han introducido como uno de los medios más eficientes de ahorro de energía en el sector de la construcción (Liu y Baskaran, 2003; He y Jim, 2010). Este tipo particular de techo reduce la demanda a través de la mejora del rendimiento térmico, mientras que la vegetación consume gran cantidad de la energía solar incidente a través de sus funciones biológicas -fotosíntesis y transpiración-, reduciendo la radiación que afecta a la temperatura interna en comparación con un techo desnudo (Wong *et al.* 2003, Saadatian *et al.* 2013). Para una cubierta vegetada se estima que del total de radiación solar 27% se refleja, 60% se absorbe por las plantas y el sustrato, y 13% incide en el interior del edificio (Terini y Dimitris, 1998). Se ha determinado que el consumo anual de energía de una cubierta vegetada con una profundidad de suelo de 0,10 m es 14,53% menos que la de una cubierta convencional, mientras que con un sustrato de 0,20 m se logra reducir el 20,65% la transferencia de calor. También pueden reducir significativamente las temperaturas superficiales de los techos hasta 20°C, con el consecuente ahorro energético destinada a refrigeración con aire acondicionado, en valores de hasta el 80% y promedios frecuentes del 25 al 50% (Permpituck y Namprakai, 2012).

A nivel internacional, esta nueva tendencia muestra un grado de madurez importante dado que es una alternativa viable que no sólo impacta en la reducción de los efectos del calentamiento global, de la contaminación atmosférica y del nivel de ruidos sino también en la disminución del efecto de isla de calor y en el acondicionamiento térmico de la edificación, con la consecuente disminución de los consumos de energía (Dunnet y Kingsbury, 2004; Blanc, 2008; Wonga *et al.*, 2009). Estudios previos han demostrado que dependiendo del clima de la región y de la cantidad de vegetación, la economía de energía varía entre un 35-95% (Alexandri y Jones, 2006). Si bien en Europa y América del Norte estas tecnologías ya están siendo aplicadas, su incorporación a los contextos locales se encuentra todavía en su fase inicial y de experimentación.

En nuestro país el interés por estas tecnologías se ha incrementado a partir del año 2013. Desde entonces han surgido además de programas, documentos y aplicación en obras emblemáticas; empresas generadoras de esta tecnología con aplicación en obra y uso de materiales utilizados en otros países. Sin embargo, su implementación requiere evaluar el desempeño energético del sistema en relación a las distintas zonas climáticas.

Para el Área Metropolitana de Mendoza (AMM), emplazada en un contexto de aridez, se plantea la necesidad de avanzar en el estudio y desarrollo de sistemas de naturación urbana que emplee especies de bajo requerimiento hídrico. Estudios locales indican que el potencial de incorporación de nuevas tecnologías verdes es elevado en la alta densidad constructiva de la ciudad capital -61%- (Flores Asin *et al.*, 2013). La aplicación de estas tecnologías con su adaptación hídrica permitirá incorporar masa vegetal al espacio urbano-edificio y contribuir al ahorro energético de los espacios interiores. Esta incorporación conforma una estrategia de mitigación de los efectos de la antropización del entorno y contribuye a valorizar la calidad energética y ambiental, logrando un uso racional de los recursos disponibles en la región (agua, radiación solar y energía para climatización).

El presente trabajo evalúa a partir de ensayos experimentales, el efecto de cubiertas vegetadas en zonas de clima cálido-seco sobre el comportamiento térmico de espacios interiores y su consecuente ahorro energético.

2. METODOLOGÍA

2.1. Diseño experimental

El diseño experimental planteado sigue la metodología propuesta por La Roche (2009) y tiene por objeto analizar en forma comparativa la influencia de cubiertas tradicionales y de cubiertas vegetadas adaptadas a las condicionantes locales de Mendoza, sobre el comportamiento térmico de espacios interiores. A tal fin, en el área experimental del CCT CONICET Mendoza (latitud 32°53'52.83"S, longitud 68°52'31.30"O) se montaron tres box de ensayo: un box testigo (cubierta tradicional sin vegetar CT) y dos box tratamientos de cubiertas vegetadas con distintos paquetes biológicos (denominadas CV1 y CV2).

Los box de ensayo conforman volúmenes ciegos de 1 m³, de carácter liviano y aislado al exterior. Tecnológicamente, muros y pisos están compuestos por tres capas: placa cementicia en la cara interior (espesor 10 mm), aislación térmica de poliestireno expandido de baja densidad (espesor 50 mm) y placa de fenólico en la cara exterior (espesor 18 mm), acabado esmalte sintético color blanco. La cubierta es de hormigón armado (espesor 150 mm; peso específico 2400 Kg/m³; dosificación en volumen: 1-3-3 cemento, árido grueso y fino), y está aislada hidráulicamente (membrana Sika® Sarnafil F 610-12 Felt). La cubierta empleada tiene por objeto evaluar el tipo constructivo comúnmente utilizado en la resolución de techos en el parque edilicio del AMM.

La cubierta vegetada está definida por un manto drenante Sika® GR Aquadrain Extensivo, un sistema de riego por goteo subsuperficial, sacos de geotextil (3) contenedores del sustrato (arena, orujo agotado y turba negra en iguales proporciones; espesor 150 mm) y las especies vegetales. En este trabajo se evalúan dos especies de disponibilidad local y alta tasa de reproducción agámica: *Aptenia cordifolia* (L. f.) Schwant. “Baby rose” y *Sedum spectabile* (Boreau) H. Ohba “Sedum otoño”. Dichas especies tienen semejanza poder tapizante y diferentes consumos hídricos y hábito de crecimiento (Fig. 1).

	Cubierta vegetada <i>Aptenia cordifolia</i> (CV1)	Cubierta vegetada <i>Sedum spectabile</i> (CV2)	Cubierta testigo (CT)
Características de las especies vegetales evaluadas.			
Cobertura (%)	73.10	68.30	-
Consumo hídrico (litros.m ² /año)	268	291	-
Hábito de crecimiento	Rastrero	Erguida	-

Figura 1: Diseño Experimental.

2.2. Método de medición

El diseño experimental tiene por objeto el desarrollo y monitoreo térmico de ensayos en condiciones controladas. El comportamiento térmico se evalúa a partir del registro de temperaturas -exterior e interiores- en la estación verano durante un periodo de 24 días. Los datos se registraron cada 15 minutos mediante microadquisidores de datos en la siguiente configuración: un sensor fijo del tipo Onset® HOBO® temp/RH logger UX100-003 en el espacio interior del box, dos sensores en la losa de hormigón -cara interna y externa- del tipo termocupla T EL-USB-TC con data logger incluido en cada una; y un sensor de referencia en el espacio abierto (Fig. 2).

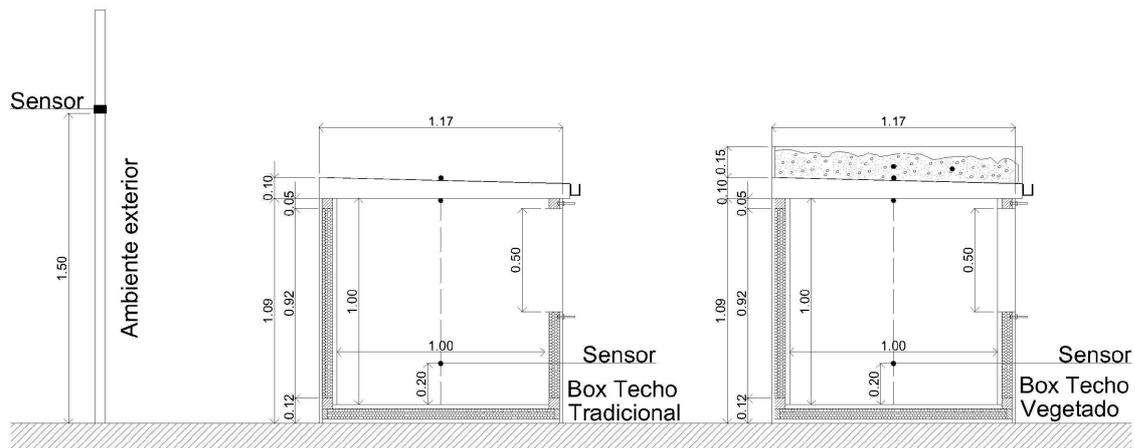


Figura 2: Distribución de sensores de temperatura.

2.3. Potencial de ahorro energético

Dentro de los 24 días que corresponden al período de medición, para el cálculo del ahorro energético se han considerado 9 (nueve) días típicos de verano - altos niveles de heliofanía y amplitud térmica, elevadas temperaturas diurnas y baja velocidad de viento-, con una máxima de radiación global superior a 600 W/m^2 y una temperatura media mayor o igual a $23 \text{ }^\circ\text{C}$ (asumida como temperatura de confort) (Fig. 3).

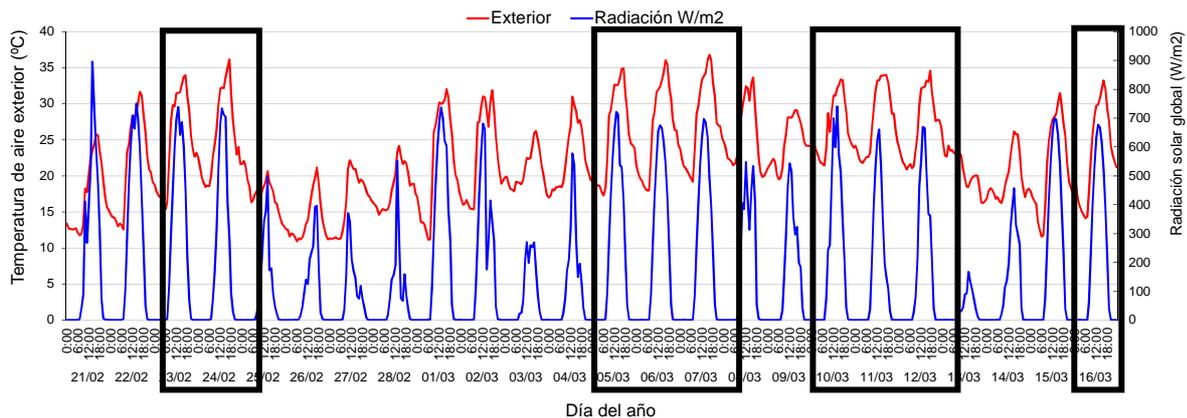


Figura 3. Temperatura exterior ($^\circ\text{C}$) y radiación global (W/m^2).

El cálculo de la demanda térmica se realiza mediante el método de grados-día desarrollado por Erbs, et al (1987).

El consumo relativo de energía eléctrica residencial se determinó en base a los datos de facturación de la serie temporal 1970 – 2012 (Secretaría de Energía de la Nación Argentina, 2012).

3. RESULTADOS

Los resultados obtenidos se analizan en forma comparativa para los tres tratamientos CT, CV1 y CV2 en torno a su comportamiento térmico y al potencial de ahorro energético que implicaría su implementación masiva en áreas urbanizadas de la provincia de Mendoza.

3.1 Comportamiento térmico

Los datos obtenidos de las mediciones térmicas fueron promediados en forma horaria para una mejor comprensión de los comportamientos globales.

Se puede observar en la Figura 5 que la temperatura máxima interior en los box de ensayo se encuentra desfasada con respecto a la temperatura exterior. En días despejados se puede notar que las temperaturas máximas y mínimas del box testigo -CT- son superiores a las exteriores en todo el ciclo de medición. Las curvas de temperatura de los box con cubiertas vegetadas -CV- se encuentran amortiguadas respecto a la temperatura exterior y al testigo. En días inestables, -nubosidad variable- se observan menores diferencias entre las temperaturas máximas y las amplitudes térmicas de los box CV respecto al testigo.

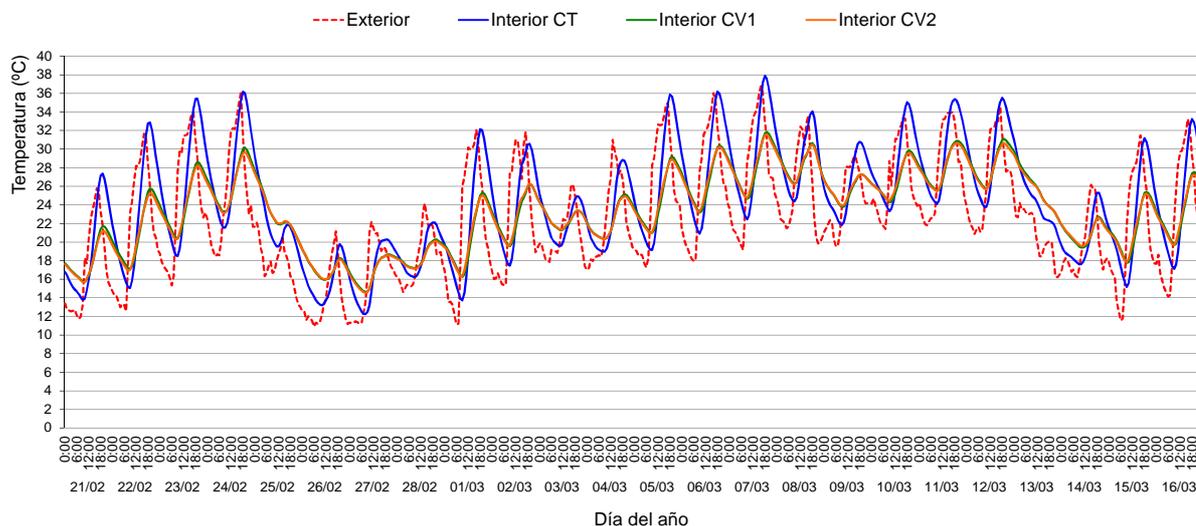


Figura 5. Temperaturas exterior e interior.

Para los días de verano, la temperatura máxima exterior es similar a la interior en el box CT (30 °C), en cambio para las cubiertas vegetadas las temperaturas máximas interiores son menores en 4.4 °C a 4.5 °C, para CV2 y CV1 respectivamente.

La temperatura media interior del box CT excede a la exterior en 2 °C, en cambio para las cubiertas vegetadas no supera 1°C.

La temperatura mínima presenta valores menores para el exterior que para el interior de los box. La mínima media es de 18.7 °C para el CT y 20.6 °C para CV1 y CV2.

La temperatura exterior presenta una amplitud térmica media de 14.2 °C. Al observar las amplitudes térmicas medias interiores se observa una diferencia de 2 °C entre CT respecto a la exterior. En cambio la amplitud térmica registrada en el interior de los box CV1 y CV2 es del orden de los 6 °C, respecto de los 14 °C de la temperatura exterior; esto demuestra la eficiencia del poder aislante de las cubiertas vegetadas (Tabla 1).

Temperatura (°C)		Exterior	Interior		
			CT	CV1	CV2
Máx.		30.2	30.9	26.6	26.4
Med.		22.5	24.2	23.4	23.3
Mín.		16.0	18.7	20.6	20.6
ΔT		14.2	12.2	6.0	5.8

Tabla 1: Temperaturas media exterior e interior para los 24 días de medición.

3.2 Potencial de ahorro energético

En los tres tratamientos, la temperatura promedio diaria interior se encuentra fuera del rango de confort (CT: 27.83°C; CV1: 26.28°C; CV2: 26.21°C) (Tabla 2). Los box CV1 y CV2 respecto al testigo presentan una diferencia entre temperaturas medias del orden de 1.5 °C y 1.6 °C, respectivamente. Lo que indica que ambas cubiertas vegetadas presentan temperaturas medias menores a las del box CT. La variación leve de la temperatura media entre CV1 y CV2 se explica por las diferencias intrínsecas a las especies vegetales utilizadas.

Día	T (°C) promedio diaria exterior	T (°C) promedio diaria interior			Δt diaria interior = CT-CV	
		CT	CV1	CV2	CT - CV1	CT - CV2
1	24.77	26.31	24.15	24.03	2.15	2.28
2	25.63	28.15	26.37	26.16	1.78	1.99
3	25.70	26.39	24.57	24.57	1.82	1.82
4	26.47	28.23	26.69	26.71	1.53	1.52
5	27.58	29.63	28.11	28.13	1.52	1.51
6	26.77	28.43	26.75	26.77	1.68	1.65
7	27.75	29.48	28.11	28.02	1.38	1.47
8	26.81	29.34	28.42	28.20	0.92	1.14
9	23.13	24.54	23.37	23.30	1.17	1.24
Promedio	26.07	27.83	26.28	26.21	1.55	1.62

Tabla 2: Impacto de las temperaturas exteriores en los espacios interiores en días típicos.

Con el fin de analizar comparativamente el consumo energético derivado de la necesidad de enfriamiento, se realizó el cálculo de las diferencias de temperatura promedio, asumiendo como temperatura de confort 23 °C. Dichos valores fueron calculados para los 9 días de análisis. El cociente entre la sumatoria de diferencias de temperatura permite definir los requerimientos de energía de CV1 y CV2 respecto al box testigo -CT-. (Tabla 3)

Los resultados muestran respecto al testigo CT un consumo del 68% en el tratamiento CV1 y del 66% en el tratamiento CV2. Esto implica que variaciones interiores de temperatura del orden de 1.5 °C generan ahorros de energía del 32% para CV1 y variaciones de 1.6 °C generan ahorros de energía del 34% para CV2 (Tabla 3).

Día	ΔtCT (°C)	ΔtCV1 (°C)	ΔtCV2 (°C)	ΔtCV1/ΔtCT (%)	ΔtCV2/ΔtCT (%)
1	3.31	1.15	1.03		
2	5.15	3.37	3.16		
3	3.39	1.57	1.57		
4	5.23	3.69	3.71		
5	6.63	5.11	5.13		
6	5.43	3.74	3.77		
7	6.48	5.11	5.02		
8	6.34	5.42	5.20		
9	1.54	0.37	0.30		
Σ	43.50	29.54	28.88	67.91	66.40

Tabla 3: Consumos energéticos relativos para CV1 y CV2 en días típicos.

Si se tiene en cuenta que el consumo de energía eléctrica en el sector residencial muestra una curva creciente en el periodo comprendido entre los años 1970-2012 y que la demanda actual se ha incrementado un 10 % entre los años de menor y mayor consumo, alcanzando valores promedio en los últimos cinco años del orden del 24 % (Figura 6), puede inferirse lo siguiente: la implementación de

tecnologías verdes conforma una estrategia viable cuya implementación masiva permitiría una reducción de la demanda energética para refrigeración con el consiguiente logro de condiciones de confort en espacios interiores. Para el caso evaluado se ha conseguido una reducción energética del orden del 30 %.

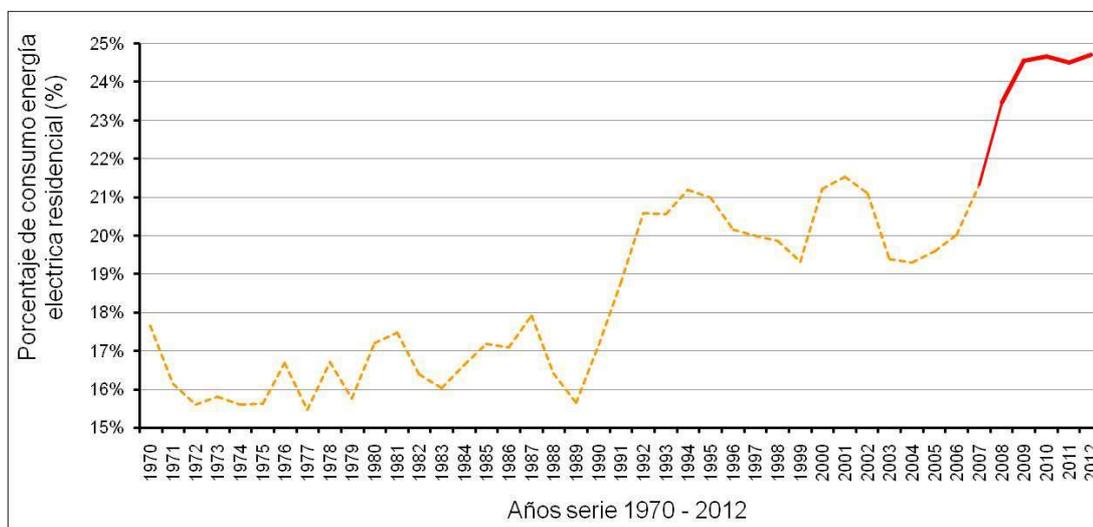


Figura 6: Consumo energía eléctrica residencial en el periodo 1970 – 2012 en Mendoza

4. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos mediante los ensayos experimentales se puede concluir que en el periodo evaluado el uso de cubiertas vegetadas sobre techos planos permite amortiguar las temperaturas en espacios interiores, disminuyendo la amplitud térmica interior alrededor de 6 °C y la temperatura máxima interior alrededor de 4.5 °C. Además, la temperatura media interior fue del orden de 1 °C menor con el uso de cubiertas vegetadas respecto a un techo tradicional sin vegetar.

La disminución de la temperatura en espacios interiores contribuye a moderar los consumos de energía en el ambiente construido. Estudios previos muestran que en viviendas con tecnologías de envolvente másica, disminuciones de temperatura del orden de 1°C reducen los consumos de energía derivados de la necesidad de enfriamiento para alcanzar condiciones de confort en el orden del 27%. Esto implica que, pequeñas diferencias de temperatura generan un alto impacto en la demanda de energía para el acondicionamiento térmico de espacios interiores (Cantón y Fernández, 2010).

Los resultados aportados en este trabajo indican que en espacios interiores conexos a la cubierta vegetada, variaciones de temperatura del orden de 1.5-1.6 °C generan ahorros de energía del 32% para *Aptenia cordifolia* y del 34% para *Sedum spectabile*.

Por último, los comportamientos térmicos entre los tratamientos con diferentes especies vegetales - *Aptenia sp.*, *Sedum sp.*- muestran diferencias poco significativas. Esto implica que es necesario ampliar el universo de especies en estudio a los efectos de identificar si es posible alcanzar mayores rangos de eficiencia. Y que, de sostenerse esta tendencia, el criterio de selección de especies en zonas áridas debe asociarse principalmente a la demanda hídrica y disponibilidad local. De las especies estudiadas, *Aptenia cordifolia* muestra ser una especie compatible con esta condición (*Aptenia sp.* 268 litros.m²/año; *Sedum sp.* 291 litros.m²/año).

5. DISCUSIÓN

El potencial de incorporación de nuevas tecnologías verdes –cubiertas vegetadas– en el AMM es elevado en alta densidad constructiva (61%) y más restringido en baja densidad (36%). Sin embargo, los mayores requerimientos en cuanto a la implementación de techos verdes se presentan en alta

densidad dada la consolidación del área y en consecuencia la baja disponibilidad de vacíos urbanos aptos para espacios verdes tradicionales.

La incorporación de vegetación sobre cubiertas planas tradicionales muestra que en verano es posible disminuir la temperatura interior en ambientes conexos a la cubierta del orden de 1.5 °C generando ahorros energéticos promedio del 33%. Según Balter et al. (2011) en el área de alta densidad constructiva de Mendoza el consumo eléctrico medio anual de un departamento en un edificio liviano (envolvente liviana/m²: 51,20%; envolvente maciza/m²: 27,15% y envolvente mixta/m²: 21,65%) es de 1490 KWh, mientras que el consumo en uno másico (envolvente liviana/m²: 5,10%; envolvente maciza/m²: 94,90%) es de 944 KWh. Estos valores indicarían que al incorporar cubiertas vegetadas (ahorro energético del 33%), el consumo anual para un departamento en un edificio liviano disminuiría a 774 KWh (195 KWh de ahorro) y para uno másico a 490 KWh (124 KWh de ahorro).

Otros autores han evaluado el comportamiento térmico de las cubiertas vegetadas en la estación invierno determinado que la temperatura en el sustrato es 7-8 °C más elevada que la temperatura alcanzada en cubiertas tradicionales y sus consecuentes ahorros de energía destinados a calefacción (Teemusk y Mander, 2010). Si bien los resultados presentados en este trabajo corresponden a la estación verano, en etapas futuras se avanzará en torno a la evaluación de las tecnologías en la estación fría a los efectos de determinar los alcances energéticos de su implementación en forma anual.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Alexandri, E., Jones, P. (2006). Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roof in diverse climates. Science Direct – Elsevier Ltd
- Balter, J., Ganem, C., Cantón M. A. (2011). Evaluación térmica y consumos energéticos en verano de departamentos ubicados a distintas alturas en edificios másicos en la Ciudad de Mendoza. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 15 p. 83 – 91.
- Blanc, P. (2008). The vertical garden in nature and the city. New York: W.W.Norton. Print.
- Cantón, M. A.; Fernández, J. (2010). Efecto de los toldos en las condiciones térmicas del espacio abierto y su influencia en los interiores en zonas áridas. Revista ERMA, Vol. 26: 1-8 (2010).
- Cárdenas, G. J. (2011). Matriz energética argentina. Situación actual y posibilidades de diversificación. Revista de la Bolsa de Comercio de Rosario. 32-36. <http://www.eeaoc.org.ar/upload/contenido/pdf/20120228122933000000.pdf>
- Dunnett, N.; Kingsbury, N. (2004). Planting Green Roofs and Living Walls. Timber Press Inc. Portland, Oregon.
- Erbs, D.G. (1987). Degree Day for Variable Base Temperatures. Proceedings of International Solar Energy Society (ISES). Vol. N° 6, pp. 387-391. Ed. J. Hages and W.Kollar.
- Flores Asin, E., Martínez, C. F.; Cantón, M. A. (2013). Tecnologías verdes. Potencial de aplicación en el Área Metropolitana de Mendoza (AMM). Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 1, pp. 05.115-05.120, 2013. ISBN 978-987-29873-0-5
- Giridharan R., Lau S.S.Y., Ganesan S. (2005). Nocturnal heat island effect in urban residential developments of Hong Kong. Energ Buildings 2005;37:9, 64-71.
- He H., Jim C.Y. (2010). Simulation of thermodynamic transmission in green roof ecosystem. Ecological Modelling 2010;221:2949–58.
- La Roche, P. (2009). Low Cost Green Roofs for Cooling: Experimental series in a hot and dry climate. PLEA - 26th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Quebec City, Canada, 22-24 June 2009.
- Liu K.K.Y., Baskaran B.A. (2003). Thermal performance of green roofs through field evaluation. Chicago, IL: National Research Council Canada; 2003. p. 1–10.
- Permpituck S. y Namprakai P. (2012). The energy consumption performance of roof lawn gardens in Thailand. Renewable Energy 40: 98-103.
- Rosenfeld E., San Juan G., Discoli C., Martini, I., Ferreyro, C., Barbero, D. (2007) Ahorro de energía en el sector residencial. Su contribución a la disminución de gases de efecto invernadero (GEI). Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 11: 07.31-07.38. ISSN 0329-5184.

- Saadatian, O., Sopian, K., Salleh, E., Lim, C.H., SafaRiffat, Elham Saadatian, Arash Toudeshki, Sulaiman M.Y. (2013) A review of energy aspects of green roofs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 23, 155–168.
- Secretaría de Energía de la Nación Argentina, 2012. <http://energia3.mecon.gov.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=3731>. Consulta: 20 de agosto 2015.
- Teemusk, A., Mander, U. (2010). Temperature regime of planted roofs compared with conventional roofing systems. *Ecol Eng* 2010;36:91-105.
- Terini, E., Dimitris, A. (1998). The contribution of a planted roof to thermal protection of building in Greece. *Energy Buildings* 1998; 27:29-36
- Wong, N.H., Chen, Y., Ong, C.L., Sia, A. (2003). Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical Environment. *Build Environ* 2003;38:2, 61-70.
- Wonga, N. H.; Tan A. Y.; Tan, P. Y; Wongc, N.C. (2009). Energy Simulation of Vertical Greenery Systems. *Energy and Buildings, Lausanne*, v.41, n,12, p.1401-1408.

ABSTRACT: The green roofs are an urban greening strategy which mitigate the effects of global warming, by reducing urban temperatures and energy consumption derived from indoor thermal conditioning in summer. This paper assesses from experimental trials, the effect of vegetated roofs in warm-dry climate on the thermal behavior of interior spaces and consequent energy savings. The method consists in measuring the air temperature in experimental cells with data loggers HOBO, during the 2015 summer season. The results show that in indoor spaces linked with the green roof, internal temperature variations of the order of 1.5-1.6 °C generate savings of electricity for cooling interior spaces from 32% to 34%. The experimentation of these new green technologies at the regional level is important to ensure their proper implementation in the framework of energy savings and the rational use of available resources.

7° Jornadas Regionales y 5° Nacionales de Ecología Urbana

EVALUACIÓN DE ESPECIES VEGETALES PARA CUBIERTAS VEGETADAS DE CIUDADES DE ZONAS ARIDAS.

ASSESSMENT OF PLANT SPECIES FOR GREEN ROOFS PLACED IN DRYLANDS CITIES

Flores Asin, J. Emiliano; Martinez, Claudia F.; Cantón, M. Alicia

Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda - Instituto Ciencias Humanas Sociales y Ambientales.
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - CCT CONICET Mendoza
E-mail: eflores@mendoza-conicet.gob.ar

Resumen

En Mendoza, la implementación de tecnologías verdes -techos y muros vegetados- es un desafío a alcanzar para incrementar áreas verdes y una necesidad derivada de un conjunto de factores: la densificación edilicia, la sustentabilidad del modelo de desarrollo y la ausencia de vacíos urbanos que no permite incorporar a la trama, estructuras verdes tradicionales (arbolado viario, parques plazas, patios).

Sin embargo los limitantes regionales, en especial el recurso hídrico, requieren seleccionar especies adecuadas que reúnan aptitudes para crecer en sistemas extensivos, que complementen a las empleadas internacionalmente en cubiertas verdes (*Sedum spp.*) y que sean de alta disponibilidad en el mercado local.

A partir de un universo de análisis de 34 especies, se desarrolla una metodología de evaluación con el objeto de seleccionar especies apropiadas para integrar el paquete biológico de cubiertas verdes. La misma consistió en la valoración y ponderación en una escala reducida (1 a 5) de trece indicadores, entre ellos, requerimiento hídrico, poder de cobertura, resistencia a sequía, adaptación a exposición solar, etc. La aplicación de dicha metodología permitió la selección de 14 especies a los efectos de evaluar consumo hídrico y cobertura en ensayos experimentales bajo condiciones controladas.

Los primeros resultados indican que para el ciclo de crecimiento 2014-2015, *Lampranthus multiradiatus*, *Apentia cordifolia* e *Hymenoxys acaulis*, presentan el menor consumo hídrico (40-83 m³) y *Sedum acre*, *Hyalis argentea* y *Aptenia cordifolia* los mayores porcentajes de cobertura (55-61%). El análisis conjunto de ambas variables muestran a *Apentia cordifolia* como la especie de mayor aptitud respecto a requerimiento de agua y poder tapizante.

El análisis de un periodo mayor de experimentación permitirá determinar tendencias de comportamiento y definir especies vegetales compatibles con la condición árida del emplazamiento de modo de garantizar su permanencia en el tiempo y un uso racional del recurso hídrico.

TECNOLOGÍAS VERDES. POTENCIAL DE APLICACIÓN EN EL ÁREA METROPOLITANA DE MENDOZA (AMM).

J. Emiliano Flores Asin¹, Claudia F. Martínez², M. Alicia Cantón³

Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda – Instituto Ciencias Sociales y Ambientales (LAHV-INCIHUSA)
Centro Científico Tecnológico (CCT Mendoza). Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Tel. 0261-5244310. Fax 0261-5244001. E-mail: eflores@mendoza-conicet.gov.ar

Recibido 15/08/13, aceptado 30/09/13

RESUMEN: En el marco del PICT 0611 denominado “Diseño eficiente y nuevas tecnologías verdes para la consecución de la sustentabilidad urbana en zonas áridas. El caso del área metropolitana de Mendoza”, este trabajo tiene como objetivo mostrar los avances realizados en torno al diagnóstico del potencial de incorporación de nuevas tecnologías verdes en la ciudad de Mendoza. Se evaluó la disponibilidad de superficies cubiertas para la incorporación de espacios vegetados no convencionales: “techos verdes”. El objetivo es proponer estrategias eficientes para el enverdecimiento urbano y edilicio que garanticen el equilibrio entre ambiente natural y construido en medios urbanos insertos en zonas áridas. Los primeros resultados muestran un mayor porcentaje de techos planos (61%) de posible aptitud para colocar cubiertas verdes en el área de alta densidad constructiva.

Palabras clave: cubiertas verdes, zonas áridas, desarrollo sustentable

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas las ciudades han experimentado un marcado crecimiento como consecuencia directa de la alta tasa demográfica y de la transformación de las estructuras económicas, que condujeron al abandono de las áreas rurales y la elevada concentración de la población en los asentamientos urbanos. Estos factores han generado un incremento de la temperatura en las ciudades provocando mayores demandas energéticas y niveles de contaminación del aire, deterioro de las condiciones de confort y riesgo de vida en los sectores más vulnerables de la población.

El “enverdecimiento urbano” (urban greening) es una estrategia básica para el mejoramiento de la calidad de vida del habitante urbano y la consecución del desarrollo sustentable (Clarck & Matheny, 1998).

Una de las cualidades ambientales características de la ciudad de Mendoza es resultado de la asociación entre un sistema de riego elemental, cuyo origen se remonta a las primeras huertas precolombinas, y la arborización urbana. En un contexto climático más bien árido, la aparición del arbolado en las calles fue decisiva en la apropiación del espacio público: una nueva condición de la ciudad que también tuvo repercusiones en el comportamiento social de sus habitantes (Bochaca, 2005).

Después de los años ochenta la potencialidad de expansión demográfica del área metropolitana argentina se mantiene, favorecida por la aglomeración de bienes en su territorio y por sus funciones organizativas, pero condicionada por su propio crecimiento natural, más que por flujos de ingreso de nativos o extranjeros. Simultáneamente, las metrópolis provinciales o regionales y las ciudades intermedias que forman el sistema urbano nacional presentan en general un dinamismo demográfico superior (Cozzani, 2009).

El proceso constante de crecimiento urbano del Área Metropolitana de Mendoza (AMM) y en particular, las reformas recientes a los códigos de edificación de los municipios de Capital y Godoy Cruz, hacen prever un impacto significativo en la densificación del tejido urbano.

En el AMM entre 1980 y 2001 la tasa de urbanización, o proporción de población urbana con respecto a la población total, pasó del 68% al 79% en relación con un aumento de 413.313 habitantes. Este proceso de concentración de habitantes en las ciudades contribuyó a modificar la estructura del sistema urbano provincial, por la incorporación a la categoría urbana de poblados anteriormente rurales y por el aumento del peso demográfico de núcleos ya consolidados, algunos de los cuales cambiaron su posición jerárquica dentro del sistema (Cozzani, 2009).

Desde el punto de vista de la sustentabilidad del modelo urbano de una “ciudad oasis” inserta en un ecosistema de alta vulnerabilidad, el crecimiento de la edificación debe ser acompañado de una mayor presencia de espacios verdes. A los efectos de mantener el equilibrio entre espacio abierto y vegetado se debe tender a alcanzar índices que se aproximen a los recomendados internacionalmente (1:4) (Panasiti, 2000).

¹ Becario Inicial ANPCYT

² Becaria Posdoctoral CONICET

³ Investigadora Adjunta CONICET

Si se tiene en cuenta que en los últimos 20 años el área urbanizada del AMM se ha incrementado en un 16,57% en relación a un crecimiento del 1.1% de los espacios verdes (Informe Gestión de la Urbanización en Ciudades Turísticas, realizado por la Provincia y la Comunidad Europea 2006), y la baja proporción de vacíos urbanos en las tramas consolidadas, las alternativas de incremento de “verde” están asociadas al desarrollo de nuevas tecnologías para su incorporación a techos y paredes a modo de cubiertas verdes.

A nivel internacional, esta nueva tendencia muestra un grado de madurez importante dado que es una alternativa viable que no sólo impacta en la reducción de los efectos del calentamiento global, de la contaminación atmosférica y del nivel de ruidos sino también en la disminución del efecto de isla de calor y en el acondicionamiento térmico de la edificación con la consecuente disminución de los consumos de energía (Asla, 2007; Blanc, 2008; Dunnet & Kingsbury 2004; Wonga et al, 2009). Estudios previos han demostrado que dependiendo del clima de la región y de la cantidad de vegetación, la economía de energía varía entre un 35-95% (Alexandri & Jones, 2006).

En nuestro país el interés por estas tecnologías es reciente y se circunscribe a la elaboración de programas, documentos y aplicación en obras emblemáticas. Ejemplo de ello es el programa Terrazas Verdes desarrollado en el ámbito de la subsecretaría de Medio Ambiente de la Municipalidad de Rosario (Ordenanza N° 8.208, 2007), el proyecto de ampliación del Museo de Arte Moderno de Buenos Aires (Ambasz, 2009) y la aprobación inicial de la Ley que tiene por objeto la implementación de los denominados “Techos o Terrazas Verdes” en el ámbito de la Ciudad de Buenos Aires (Exp. 416-D-201, Agencia de Protección Ambiental APRA, 2012), conforme a lo establecido en los artículos 89 y 90 de la Constitución de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

En la región, dada la condicionante árida del emplazamiento, se plantea la necesidad de avanzar en el estudio y desarrollo de sistemas de naturación que consisten en techos verdes (intensivos/extensivos) y paredes verdes, mediante el uso de especies de bajo requerimiento hídrico. La aplicación de estas tecnologías con su adaptación hídrica al medio urbano, permitirá incorporar masa vegetal al espacio urbano-edificio. Esta incorporación conforma una estrategia de mitigación de los efectos de la antropización del entorno y contribuye a valorizar la calidad energética y ambiental, sin comprometer el recurso agua, el cual es escaso y altamente demandante para consumo humano y agrícola en la región.

Este trabajo evalúa el potencial urbano de incorporación de tecnologías verdes, mediante el estudio de una categoría de espacio urbano vegetado: “las cubiertas verdes” mediante un diagnóstico inicial de las superficies planas disponibles en el AMM. La hipótesis de trabajo plantea que el diseño y la incorporación de tecnologías verdes apropiadas a zonas áridas constituyen una estrategia para el desarrollo urbano-edificio sustentable. Esta situación contribuye a fortalecer las condiciones ambientales del oasis a escala micro y disminuir los consumos energéticos y el calentamiento global a escala macro. El objetivo final consiste en proponer diseños y tecnologías eficientes para el enverdecimiento urbano y edificio que garanticen el equilibrio entre ambiente natural y construido en medios urbanos insertos en zonas áridas.

METODOLOGÍA

Para el análisis del potencial urbano de cubiertas planas, aptas para la incorporación de tecnologías verdes, se seleccionó una muestra representativa de situaciones urbanas típicas.

El Área Metropolitana de Mendoza (AMM) presenta una trama urbana en cuadrícula con manzanas regulares de 100m x 100m, dimensiones de lotes típicos de 10m de frente y profundidad variable (20-50m), anchos de calles de 16, 20 y 30 m y densidades constructivas variables relacionadas con los diferentes usos del suelo. La clasificación de las mismas a partir del valor de densidad volumétrica (relación entre volumen construido y superficie de terreno) define dos grupos:

- Alta densidad: Densidad volumétrica mayor de $4 \text{ m}^3/\text{m}^2$
- Baja densidad: Densidad volumétrica de $1 \text{ a } 2 \text{ m}^3/\text{m}^2$

En el marco de dichas densidades han sido seleccionadas 20 manzanas distribuidas de la siguiente forma: 9 manzanas de alta densidad y 11 manzanas de baja densidad, como se puede observar en la figura 1.

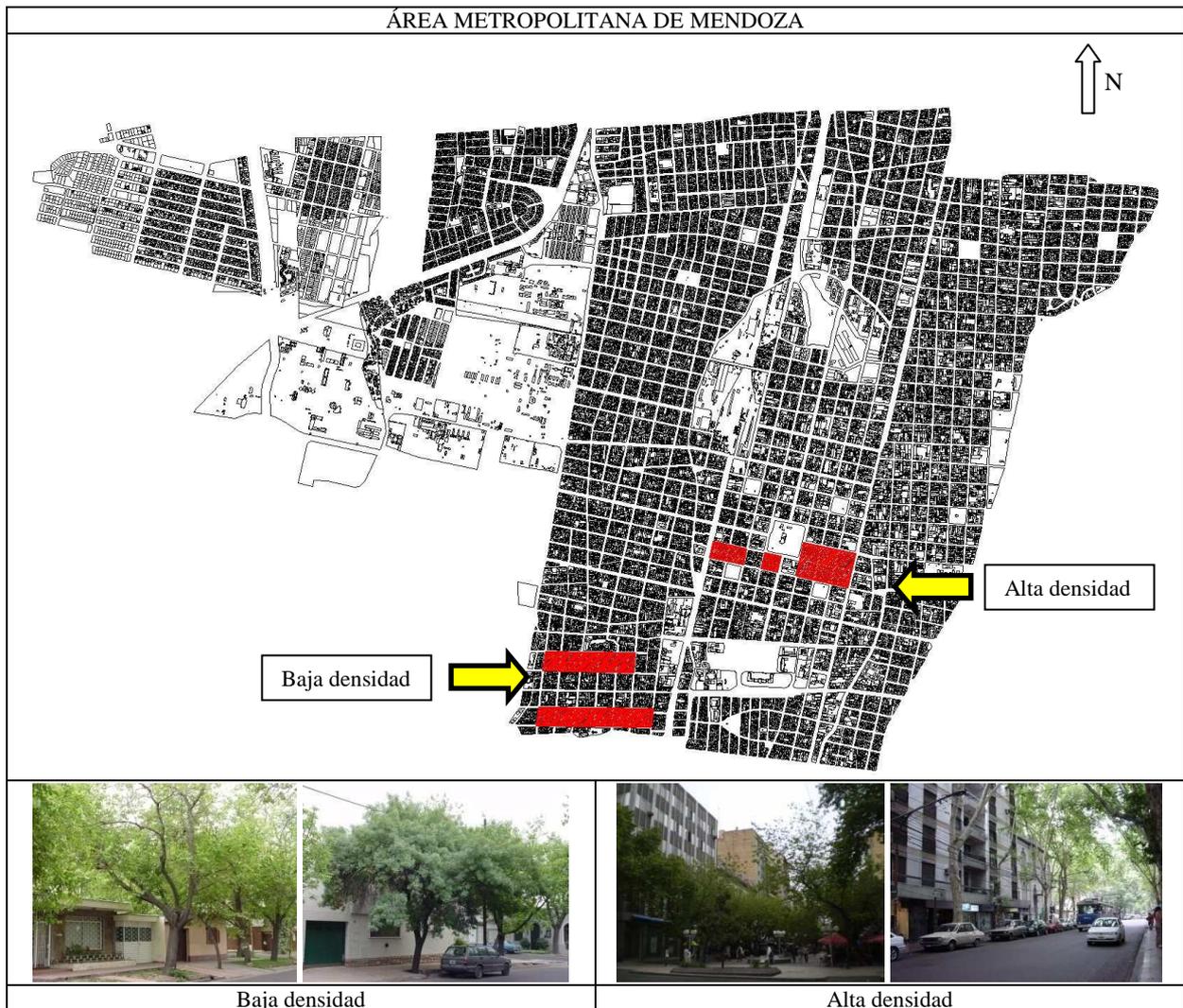


Figura 1: Área de estudio seleccionada.

La metodología seguida consistió en la identificación de la superficie cubierta y la superficie abierta en las manzanas urbanas seleccionadas para cada densidad constructiva a partir del uso de programas informáticos de diseño asistido por computadora (Autocad). Las fuentes de información utilizadas a nivel primario fueron los planos catastrales de la Ciudad de Mendoza (2005) y como información complementaria se utilizaron imágenes satelitales extraídas de Google Maps y Google Earth para corroborar el uso del suelo en los planos catastrales.

Se han identificado las siguientes categorías:

- Techos planos, se refieren a las superficies potenciales de utilización de nuevas tecnologías verdes (techos verdes), dependiendo de su capacidad portante.
- Otros, se incluye en este grupo, aquellas cubiertas que por su condición liviana no permiten la incorporación de tecnologías verdes, debido a su condición de techos inclinados, como techos de chapa, de madera, de tejas, etc. Se consideran también en esta categoría: tanques de agua, cajas de escalera, etc.; como también otros elementos que no permiten el uso de la cubierta, como telas media sombra, toldos, etc.

Una vez identificados los dos tipos de superficies anteriormente mencionados, se ha calculado el área correspondiente a cada uno de ellos por manzana, para su posterior procesamiento estadístico.

RESULTADOS PARCIALES

La distribución porcentual de las superficies relevadas por densidad constructiva se observa en la figura 2. En ella se diferencian las superficies de espacios abiertos, aptos para ser utilizados como espacios verdes tradicionales, y las de espacios cubiertos por manzana. La superficie cubierta ha sido dividida en dos categorías: techos planos y otros.

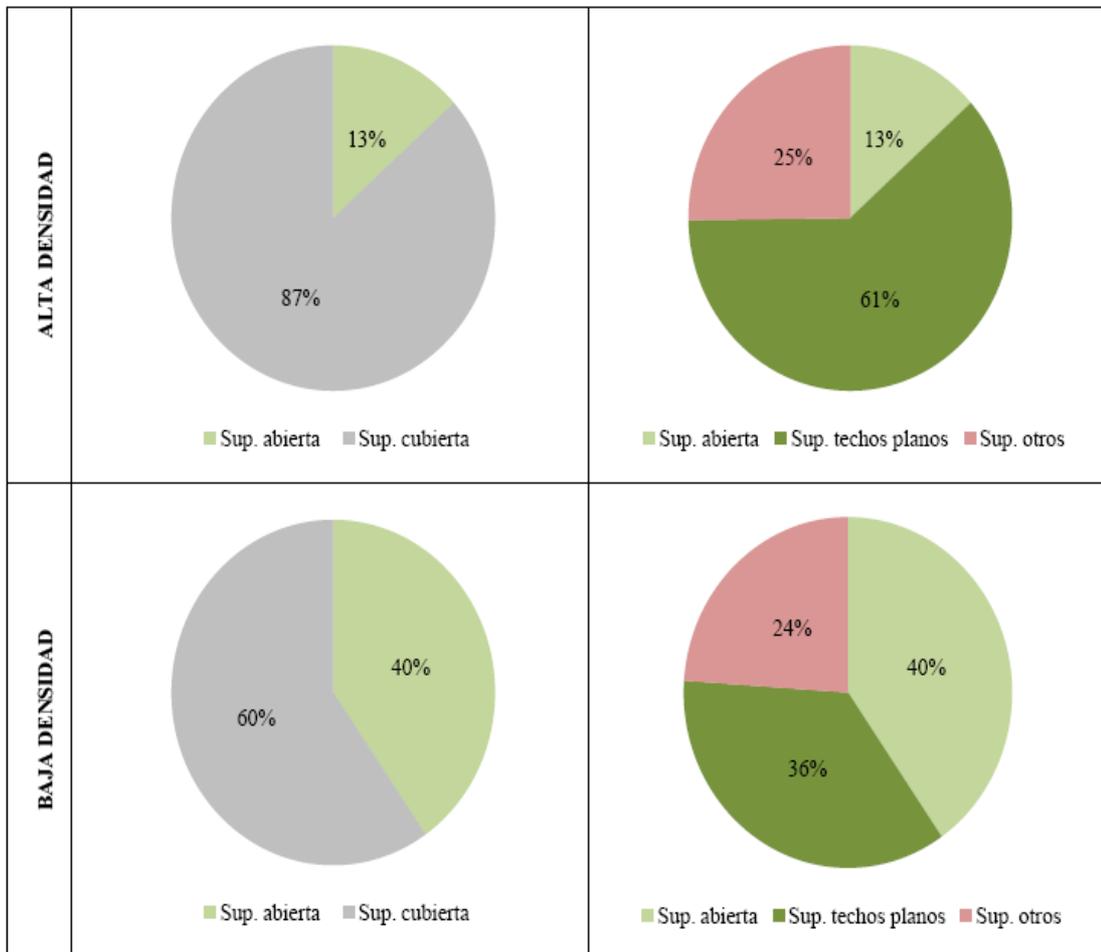


Figura 2: Caracterización de superficies medias en el área en estudio.

La figura 3 muestra los valores de cada manzana en relación al porcentaje disponible de techos planos, para diferentes densidades constructivas.

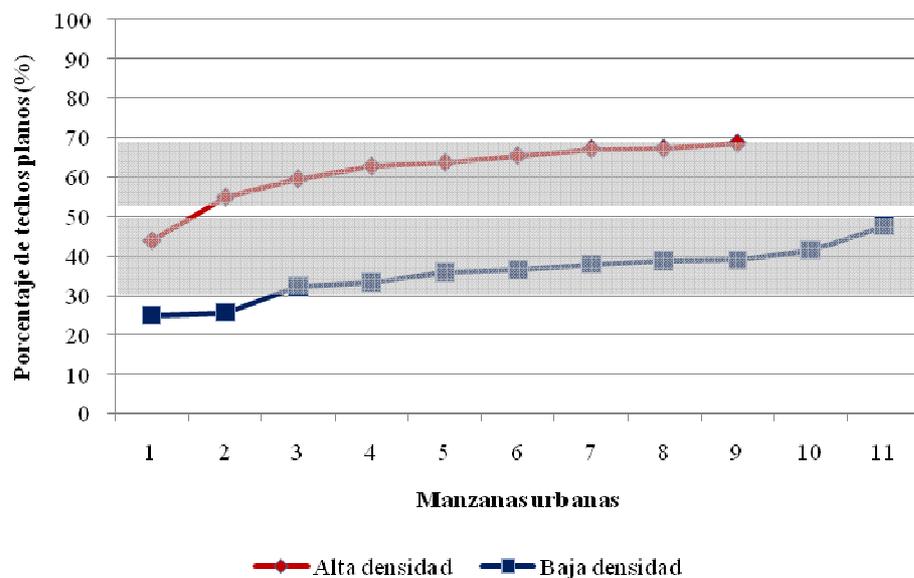


Figura 3: Porcentaje de techos planos en las distintas densidades constructivas. Cada franja gris indica el rango porcentual de disponibilidad respectivo.

Estos resultados obtenidos a partir de la metodología descripta permiten definir lo siguiente:

En Alta Densidad se observa un bajo porcentaje promedio de espacio abierto (13%), en relación al espacio cubierto (87%). Del total de la superficie cubierta relevada, el 61% corresponde a techos planos, lo que indica una alta disponibilidad para la potencial incorporación de cubiertas verdes (figura 2). El 89% de los casos analizados se encuentran comprendidos en un rango del 55% al 68% de techos planos (figura 3). Del total de los casos relevados, el 11% muestra un elevado porcentaje de espacio abierto, su verificación con imágenes satelitales y posterior observación a campo, permite determinar la presencia de vacíos urbanos. Esta situación indica que no existe posibilidad de aumentar los espacios verdes si no es mediante la incorporación de con nuevas tecnologías tales como muros o techos vegetados

La Baja Densidad muestra un 60% de superficie cubierta y un 40% de superficie abierta. Del total de la superficie cubierta, el 36% corresponde a techos planos (figura 2). Esta proporción en comparación con alta densidad (61%) es marcadamente menor. El 82% de los casos analizados tienen menos del 50% de techo plano (figura 3), es decir se encuentran comprendidos en un rango de disponibilidad de superficie apta para la incorporación de techos verdes del 30% al 50%. Este bajo rango porcentual de potencial aplicación de tecnologías verdes se equilibra con la disponibilidad de espacios abiertos destinados a patios, en los cuales será necesario garantizar la presencia de verde.

El análisis de la varianza realizado indica que áreas de alta densidad constructiva presentan significativamente mayor porcentaje medio de techos planos con respecto a las áreas de baja densidad constructiva, el cual es de 61,43% y de 35,73%, respectivamente (figura 4).

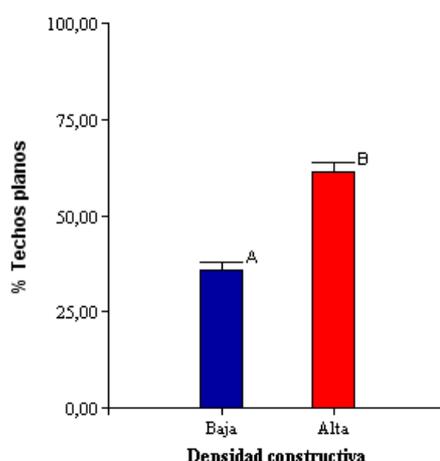


Figura 4: Porcentaje de techos planos en baja y alta densidad. Barras sobre las columnas indican la desviación estándar. Letras distintas indican diferencias significativas según el Test de Tukey aplicado ($\alpha=0,05$).

CONCLUSIONES

El potencial de incorporación de nuevas tecnologías verdes –cubiertas vegetadas– es elevado en la alta densidad constructiva (61%) y más restringido en baja densidad (36%). Sin embargo, dado que esta última se corresponde con áreas residenciales, presenta mayor disponibilidad de superficie abierta (40%) para la aplicación de tecnologías verdes tradicionales (patios ajardinados). En los techos planos, el enjardinado otorga una notable protección contra las perjudiciales influencias climáticas y alarga por lo tanto considerablemente la vida útil del techo (Minke, 2009).

En etapas futuras se evaluará la capacidad portante de las cubiertas planas a los fines de determinar con mayor precisión el potencial efectivo de incorporación de cubiertas verdes a la edificación del AMM. Estructuras de este tipo, que se encuentran a menudo en edificios, significan para la construcción de techo plano, un peso adicional de 100 hasta 300 kg/m² y considerables incrementos de costo (Minke, 2009).

REFERENCIAS

- ASLA. (2007). ASLA Green Roof Monitoring Results.
- Alexandri, E.; Jones, P. (2006). Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roof in diverse climates. Science Direct – Elsevier Ltd.
- Cozzani, M. R. (2009). Nuevas tendencias en la dinámica demográfica y en el crecimiento urbano de la provincia de Mendoza, Argentina. Tiempo y espacio. Año 20 Vol., 23 / 2009, Pág. 63- 76
- Blanc, P. (2008). The vertical garden in nature and the city. New York: W.W.Norton. Print.
- Bochaca, F. (2005). El verde en la estructura urbana de Mendoza. ARQ (Santiago) n. 60 Arquitectura de Infraestructura.
- Clarck, J.R., Matheny, N.P. (1998). A model of Urban Forest Sustainability: Application to Cities in the United States. Journal of Arboriculture 24 (2).
- Dunnett, N.; Kingsbury, N. 2004. Planting Green Roofs and Living Walls. Timber Press Inc, Portland, Oregon.
- Informe Gestión de la Urbanización en Ciudades Turísticas (2006). Provincia y Comunidad Europea en el año 2006.

- Ley de Aprobación Inicial-416. 2012. Implementación de Techos o Terrazas Verdes en el ámbito de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires.
http://boletinoficial.buenosaires.gob.ar/areas/leg_tecnica/boletinOficial/documentos/boletines/2012/08/20120813.pdf
- Minke G. (2009). Techos verdes. Planificación, ejecución, consejos prácticos. Editorial Fin de Siglo.
- Ordenanza N°8208. 2007. Subsecretaría de Medio Ambiente de la Municipalidad de Rosario.
<http://www.rosario.gov.ar/normativa/verArchivo?tipo=pdf&id=48797>
- Panasiti, A. (2000) Mendoza en el 2000, 20 pp. 171
- Wonga, N. H.; Tan A. Y.; Tan, P. Y; Wongc, N.C. 2009. Energy Simulation of Vertical Greenery Systems. Energy and Buildings, Lausanne,v.41, n,12, p.1401-1408.

ABSTRACT:

Within the framework of the 0611 PICT called "Efficient design and new green technologies to reach the urban sustainability in dry zones. The case of Mendoza's metropolitan area", this report aims to determine the potential to incorporate new green technologies in the city of Mendoza. It was assessed the availability of flat roofs to add "green roofs". The final goal of this study is to propose efficient strategies for urban and building greening to ensure the balance between natural and built environment in urban areas placed in dry zones. First results show a higher percentage of flat roofs, to add green technologies, on high building density (61%).

Keywords: green roofs, dry zones, sustainable development.