

IMPACTO DE SISTEMAS DE ENVERDECIMIENTO VERTICAL EN EL COMPORTAMIENTO TERMO-ENERGÉTICO DE ESPACIOS URBANO EDIFICIOS. ANÁLISIS CRÍTICO DEL ESTADO DEL ARTE

P. Suárez,¹ M. Alicia Cantón,² Érica N. Correa²

Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE - CCT CONICET Mendoza)
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Av. Ruiz Leal s/n. Parque Gral. San Martín. C.P. 5500 – Mendoza
Tel. 0261-5244310 – Fax 0261-5244001 e-mail: psuarez@mendoza-conicet.gov.ar

Recibido 12/08/18, aceptado 24/09/18

RESUMEN: El trabajo evalúa el potencial de los Sistemas de Enverdecimiento Vertical (SEV) como reguladores de las condiciones termo-energéticas de los espacios a escala urbano-edilicia. Se analizan sistemáticamente distintos aspectos del conocimiento científico producido durante la última década: distribución geográfica y climática, categoría de SEV, métodos y resultados. La temática ha crecido a nivel mundial y muestra eficiencia en la disminución de las temperaturas de los espacios habitables exteriores e interiores y los consumos de energía, cuya magnitud depende del clima. Las Paredes Vivas son el sistema más eficiente, generando disminuciones máximas de 6.5 °C en la temperatura interior, 3.3 °C en la temperatura exterior, 26 °C en la temperatura superficial y 59 % en el consumo de energía. Esto avala la generación de conocimiento local asociado a los beneficios termo-energéticos de los SEV en climas desérticos y su adecuación a las características morfológicas y tecnológicas del parque edilicio de Mendoza.

Palabras clave: Sistemas de Enverdecimiento Vertical; eficiencia termo-energética; zonas áridas.

INTRODUCCION

En las ciudades, la antropización del medio eleva las temperaturas urbanas y los consumos de energía en edificios, representando el 35% de la energía consumida a nivel mundial. Crear “comunidades frescas” es un imperativo internacional y refrendado en la República Argentina por el Plan de Acción para el Cambio Climático. En los países desarrollados diversas estrategias de mitigación han sido propuestas y están siendo estudiadas a fin de determinar su efectividad y eficiencia en relación a los costos asociados a su implementación (Doulos et al., 2004; Synnefa et al., 2005 y 2007; Zinzi et al., 2012). Entre ellas, el enverdecimiento urbano como alternativa para incrementar la cobertura vegetal de los espacios. Los efectos de las diferentes formas de infraestructura verde en el enfriamiento de la ciudad y su impacto sobre los consumos de energía de los edificios y la mejora del confort térmico han alcanzado un grado de desarrollo y madurez suficiente. Dichas investigaciones han permitido determinar que en un clima templado el aumento de la proporción de la infraestructura verde en un 10% podría reducir las temperaturas medias del aire urbano 2.5° C (Gill et al, 2007), reducir la frecuencia y magnitud de la isla de calor urbana y ahorrar hasta un 20% del uso de energía convencional, debido a la menor demanda de aire acondicionado (Akbari et al, 2004).

Sin embargo, el fenómeno de consolidación de las ciudades ha limitado el potencial de incorporación de estructuras verdes tradicionales – parques, plazas, arbolado de alineación- surgiendo nuevas formas de vegetación asociadas a su incorporación a las envolventes edilicias: Techos y paredes verdes. A nivel internacional existe un bagaje de conocimiento importante respecto al desarrollo tecnológico y la cuantificación de los beneficios de las cubiertas verdes (K. Vijayaraghavan, 2016); siendo más incipientes los avances respecto a paredes vegetadas.

¹ Becario Doctoral CONICET

² Investigadora Independiente CONICET

El Área Metropolitana de la ciudad de Mendoza, Argentina, (AMM) se inserta en una zona signada por la aridez y la restricción de los recursos hídricos. Desde el punto de vista de su concepción urbanística, cuenta en su estructura con una importante cantidad de espacios abiertos forestados, que ha dado lugar a un modelo urbano calificado como ciudad “oasis” (Bórmida, 1984).

Sin embargo, se trata de una ciudad consolidada, con baja disponibilidad de vacíos urbanos. Por otra parte, desde el punto de vista energético- ambiental la ciudad presenta severos problemas asociados al aumento de la temperatura urbana, con una magnitud de isla de calor que alcanza los 10 °C (Correa, 2006). Dicho fenómeno tiene un impacto directo en las condiciones de habitabilidad de los espacios urbano-edilicios y en los consumos de energía para alcanzar condiciones de confort.

Las consideraciones descriptas, en términos de pérdida de espacios verdes y de la debilidad de las condiciones ambientales de la ciudad plantean la necesidad de incorporar masa vegetal a la ciudad a través de la implantación de nuevas tecnologías como estrategia para la consecución de la sustentabilidad urbano-edilicia.

Este trabajo busca analizar y compactar el conocimiento científico internacional, para determinar el estado del arte respecto al impacto de los Sistemas de Enverdecimiento Vertical (SEV) en la regulación de las condiciones térmicas de los espacios a escala urbana y edilicia y, sus impactos energéticos. Persigue determinar el potencial de la estrategia en esta área temática y sus posibilidades de implementación en medios urbanos de zonas áridas.

Categorías de Sistemas de Enverdecimiento Vertical (SEV)

Los SEV se agrupan en tres categorías: Fachada Verde, Pared -muro- Viva y Sistemas Mixtos que poseen características de las categorías anteriores (Fig. 1).

Fachadas Verdes son todos aquellos sistemas en los que hay plantas trepadoras y/o arbustos colgantes cubriendo un área determinada. Las plantas están sembradas en terreno natural (o base de la estructura) o en macetas ubicadas a distintos niveles de la fachada. Pueden dividirse en tres tipologías: *fachadas verdes tradicionales*, donde la estructura de la planta es el mismo muro del edificio; *fachadas verdes tipo doble piel o cortina verde*, donde existe una estructura suplementaria que se separa una distancia variable de la pared del edificio; y *fachadas verdes con macetas perimetrales*, donde pueden alojarse macetas a distintos niveles con plantas trepadoras y/o arbustos colgantes para generar una cortina verde.

Las fachadas verdes tradicionales se consideran aquellas hechas por plantas trepadoras que se desarrollan directamente en la pared del edificio sin ningún sistema de sujeción. Esta práctica de paisajismo se ha asociado típicamente con daños a los materiales de la fachada, atracción de animales y altos costos de mantenimiento. Sin embargo, recientemente, se están desarrollando diferentes sistemas de construcción. Estos nuevos sistemas permiten reverdecer las fachadas de los edificios, que han evolucionado técnica y conceptualmente con respecto a las tradicionales.

Las fachadas verdes tipo doble piel, las presentan distintas alternativas como: *enrejados modulares, estructuras de malla y cableados*. Los *enrejados modulares* son módulos de rejillas adosados a la pared del edificio o en estructuras independientes, que funcionan de sostén de las plantas trepadoras. Las *estructuras de cableados* son un sistema de cables de acero, anclajes, separadores, etc., que constituyen una estructura liviana que sirve de soporte para las plantas trepadoras.

Las *estructuras de malla* son estructuras ligeras que proporcionan soporte para las trepadoras, hecha con malla metálica anclada a la estructura del edificio. Estos últimos sistemas son adecuados para realizar refacciones y remodelaciones, ya que no implican un peso adicional a la estructura de las edificaciones.

Las *Paredes Vivas* implican un sustrato o masa fértil propicio para el crecimiento de las plantas. Se clasifican en dos tipologías de acuerdo a la técnica constructiva: *paneles modulares* y *fieltros geotextiles*, que se sujetan a un soporte (vertical u horizontal) o en la estructura de la pared.

Los *paneles modulares* y *fieltros geotextiles* brindan soporte a la vegetación -helechos, pequeños arbustos caducos o perennes, entre otros-. Los paneles pueden presentar orificios a través de los cuales crece la vegetación. Los *fieltros geotextiles* permiten albergar además musgos. Ambos pueden incorporar una cámara de aire hermética o separación de la pared (aprox. 2cm - 5cm) para brindar mejor aislación o para incorporar ese aire fresco al interior del edificio.

Las Fachadas Verdes en su conjunto son sistemas extensivos, ya que su construcción es más barata, sencilla y con bajo impacto en la construcción existente. Pueden separarse o independizarse de la estructura del edificio. Las Paredes Vivas son sistemas intensivos, debido a que comprometen de manera más invasiva la estructura del edificio, son más pesados y con mayores costos de instalación y mantenimiento.

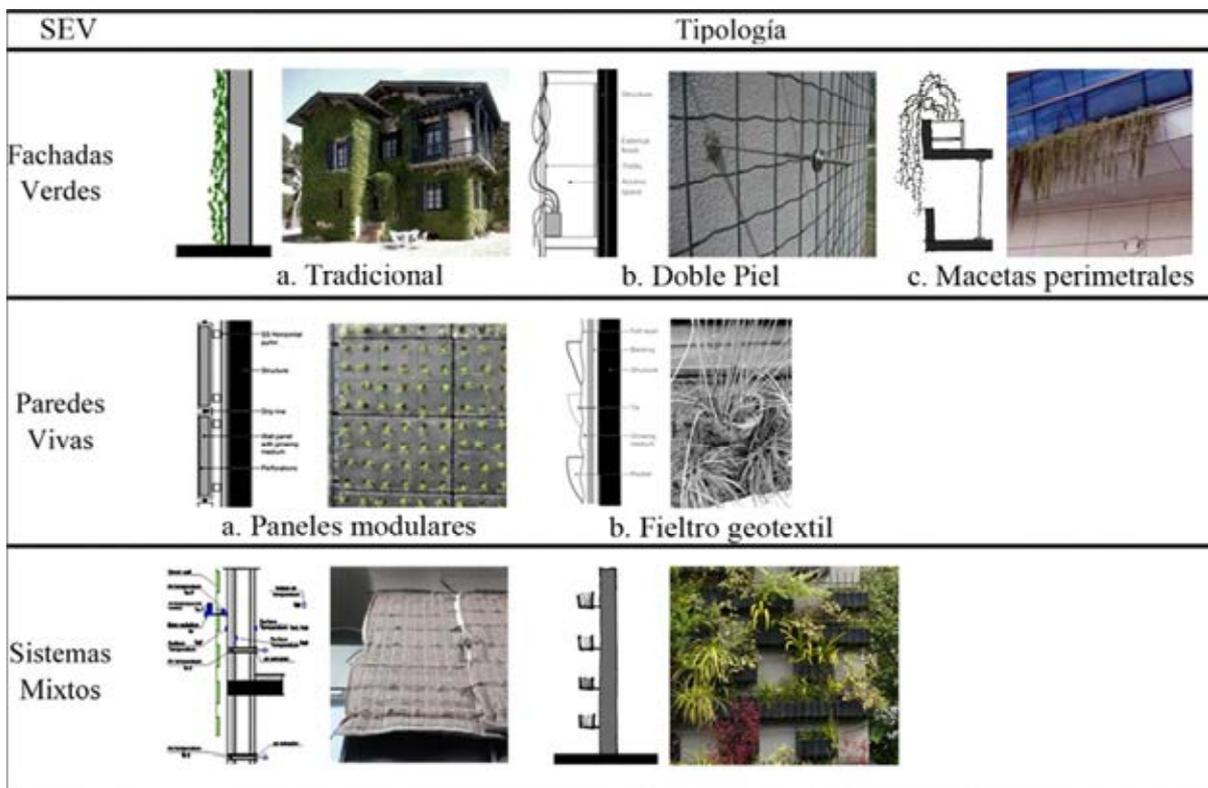


Figura 1: Tipologías de SEV.

Efectos producidos por los SEV

Los beneficios termo-energéticos de los SEV están asociados a los siguientes efectos: sombra, enfriamiento, aislación y barrera contra el viento.

El *efecto de sombra* es el que ubica a los SEV como interceptores de la radiación solar incidente, directa o indirecta. Es probablemente el efecto con mayor impacto en la reducción de las temperaturas superficiales y, como consecuencia, en la transmisión de calor a los espacios interiores.

El *efecto de enfriamiento* se debe al proceso de evaporación de agua del sustrato y las plantas. Esto incide en las variaciones de temperatura de aire interior, y temperatura y humedad del entorno inmediato. Está comprobado que el efecto de los SEV sobre la temperatura y humedad exterior se extiende hasta 60 cm de su superficie en condición aislada. En el caso de Fachadas Verdes, sólo se produce enfriamiento como consecuencia de la transpiración de las plantas. En cambio, en las Paredes

Vivas se produce además enfriamiento como consecuencia de la evaporación del agua del sustrato. En este sentido, las Paredes Vivas muestran mejor potencial de enfriamiento que las Fachadas Verdes.

El *efecto de Aislamiento* se produce como consecuencia de la interferencia de la transmisión de calor por los estratos que componen los sistemas constructivos de los SEV. Éstos pueden ser: sustratos, cámaras de aire (abiertas o herméticas), follaje, elementos estructurales y/o materiales intermedios -impermeabilizantes, etc.-. Uno de los recursos más utilizados a la hora de mejorar el efecto aislante, es la utilización de cámaras de aire intermedias. Éstas, como se dijo anteriormente, pueden ser abiertas o herméticas según sea el tipo de efecto que se busque. Si son abiertas, convierten al SEV en una fachada ventilada, y si son cerradas utilizan la capacidad aislante del aire para impedir la transferencia de calor.

El *efecto Barrera contra el Viento* se debe a que el follaje, de características rugosas y porosas, obstaculiza la circulación de aire, razón por la cual la pérdida de calor o frío por convección se ve disminuida.

METODOLOGÍA

La metodología se ha estructurado en dos etapas: rastreo bibliográfico y sistematización de contenidos.

Rastreo y recopilación bibliográfica

La búsqueda bibliográfica se orientó a identificar documentos actualizados que abordan investigaciones de carácter científico referido a SEV, en diferentes localizaciones geográficas y climáticas, en el periodo 2008 - 2018. A tal fin se rastreó información en las siguientes bases de datos digitales: ScienceDirect, ProQuest, EBSCOhost, informaworld, SpringerLink, Web of Science y Wiley Interscience. Los artículos recopilados fueron seleccionados en función de la calidad de los mismos determinada a partir del análisis sistémico de indicadores (Saracevik, 1999). De esta forma, quedo definido un conjunto de 14 trabajos que abordan el comportamiento de SEV desde el punto de su influencia en las condiciones termo-energéticas de los espacios interiores conexos y su impacto sobre el microclima del entorno.

Sistematización de contenidos

Los contenidos fueron agrupados de acuerdo a los siguientes indicadores: Distribución geográfica y climática, distribución temporal de la producción, tipologías de SEV analizadas. Además, se discriminaron las metodologías empleadas para la evaluación del comportamiento termo-energético de espacios urbano-edilicios bajo la influencia de SEV y se analizaron los resultados obtenidos en forma comparativa entre las distintos SEV. Las metodologías se clasificaron en experimentales y teóricas. En ambos casos se determinó contexto –urbano/edificio-, condición –controlada/caso real-, variables de medición, períodos medidos y equipamiento utilizado. Respecto a los métodos teóricos se analizó tipo de modelo y software.

Los resultados obtenidos fueron analizados en función de cuatro variables: diferencias de temperatura superficial entre el caso testigo y caso con SEV, diferencias de temperatura interior, diferencias de temperatura exterior y reducción del consumo energético para acondicionamiento de espacios interiores.

RESULTADOS

Distribución geográfica de los documentos analizados

Respecto a la distribución geográfica de los documentos analizados, se observa que el 64% de ellos corresponden a países europeos, el 21% a países asiáticos y el 14% restante a países sudamericanos (Fig. 2).

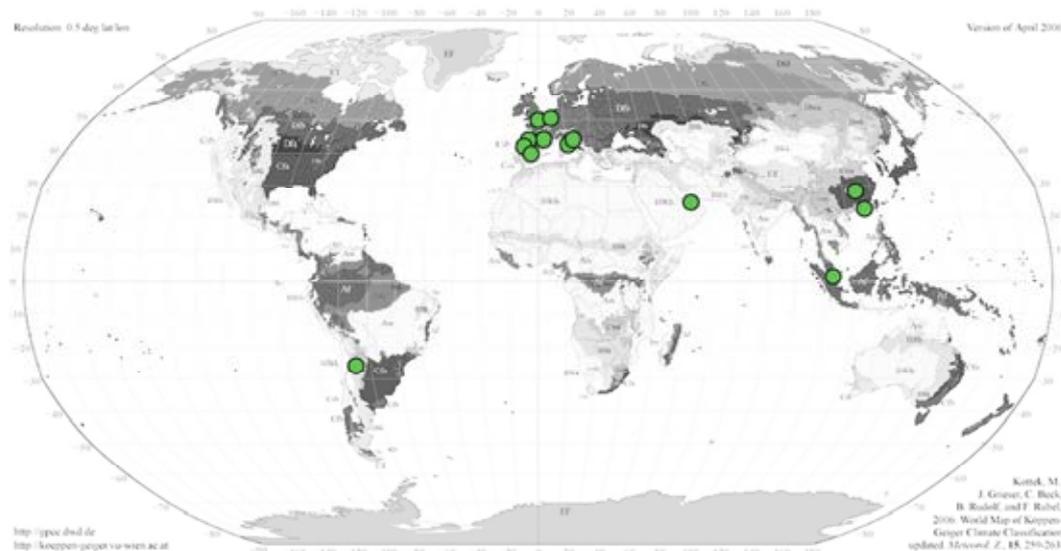


Figura 2: Distribución geográfica de documentos analizados

Distribución climática de documentos según la clasificación de Köppen, Geiger

El desarrollo de conocimiento se registra mayoritariamente en climas del tipo Cfa/Cfb (templado cálido húmedo, verano caliente) - 44%- y del tipo Csa (templado cálido, verano seco y caliente) -28%- ; y en menor medida para climas del tipo CWb (templado cálido desértico, verano caliente) -14%- , Af (Ecuatorial húmedo) -7%- y BWh (árido desértico) -7%- (Fig. 3).

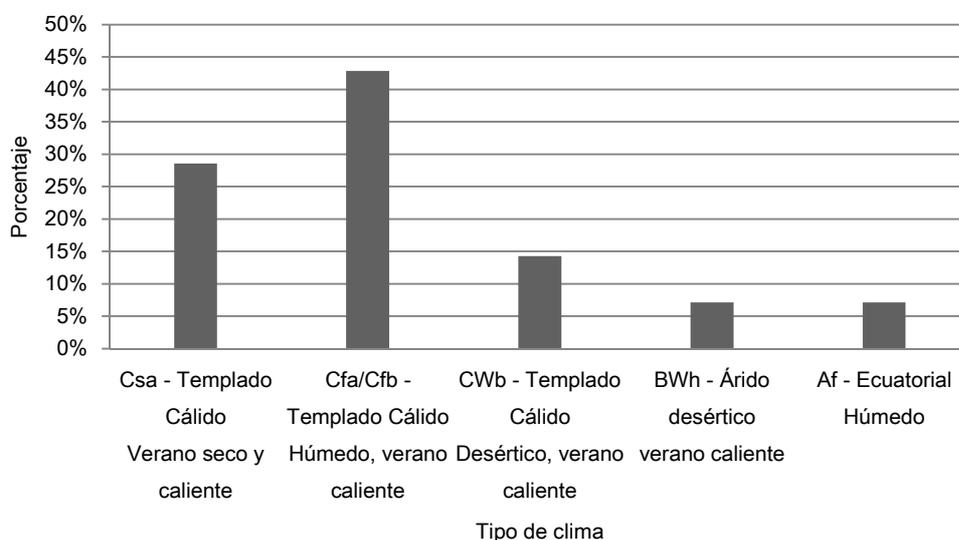


Figura 3: Distribución climática de documentos analizados

Distribución temporal de la temática

En el período 2008 – 2018 se observa una tendencia de crecimiento positiva. Durante la última década, la producción se ha incrementado 2.5 veces, es decir, creció del 10% en el año 2010 al 25% en el año 2017 (Fig. 4).

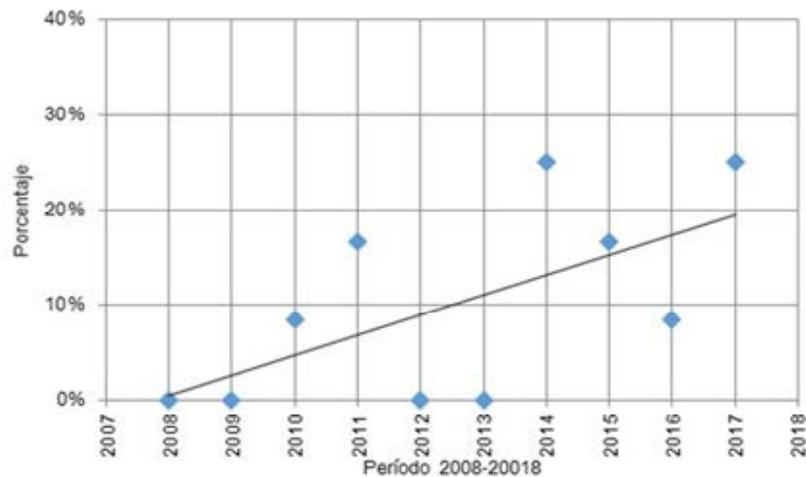


Figura 4: Distribución temporal de documentos analizados

Distribución porcentual de SEV

Dentro del conjunto de estudios analizados, las Paredes Vivas son el SEV en el cual se han centrado las investigaciones durante la última década. Del universo de documentos revisados, el 50% corresponde a Paredes Vivas, el 41% a Fachadas Verdes y el 9% a Sistemas Mixtos. Dentro del sistema denominado Paredes Vivas, las tipologías de paneles modulares presentan la mayor cantidad de casos estudiados. Y en el sistema denominado Fachadas Verdes, la más estudiada corresponde a la tipología de doble piel (Fig. 5).

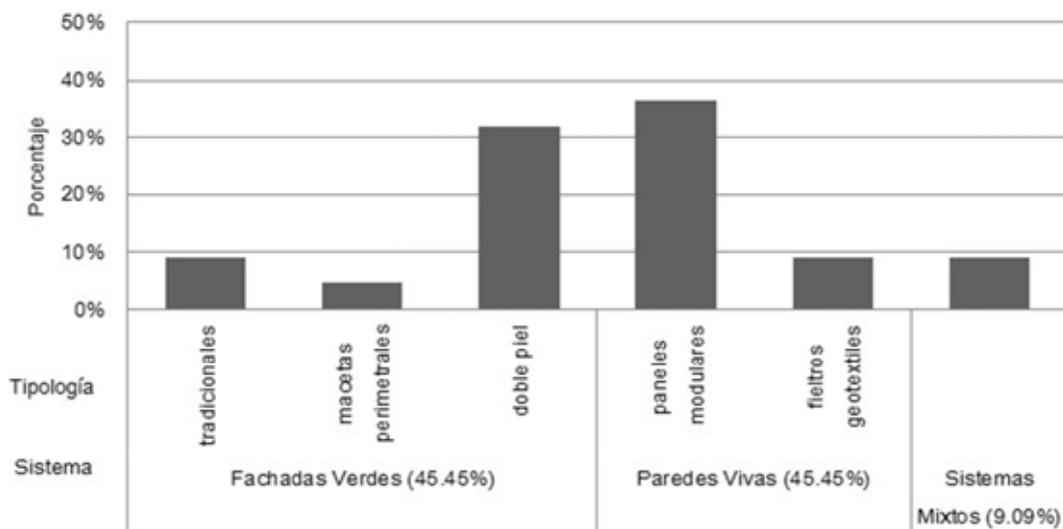


Figura 5: Distribución porcentual de SEV

Metodologías empleadas para la evaluación del comportamiento termo-energético de espacios urbano-edilicios bajo la influencia de SEV

Los trabajos evaluados han adoptado como metodología de análisis en un 58% métodos del tipo experimental y el resto de los trabajos se abordan mediante métodos teóricos.

En lo que concierne a los métodos experimentales el 62.5% corresponde a la evaluación de casos reales mediante monitoreo en campo y el resto en condiciones controladas a través del monitoreo de prototipos de muros y/o espacios a escala con SEV respecto a un caso testigo. Entre las variables medidas se encuentran: parámetros meteorológicos (radiación solar, velocidad y dirección de viento, humedad relativa, iluminancia, etc.), temperatura superficial, temperatura del aire exterior e interior, y consumo de energía.

La estación del año monitoreada con mayor frecuencia es el verano (seis de ocho casos evaluados), si bien algunos autores evalúan las dos estaciones extremas (dos de ocho casos), y otros, estaciones intermedias (tres de ocho casos). El período de medición es variable, comprendiendo lapsos de tiempo continuos máximos de treinta días, y mínimos de un día. La frecuencia de toma de datos también es variable, registrando a los mismos cada quince segundos hasta una única medición por semana a una hora determinada.

En relación al equipamiento de medición, en el 50% de los casos la temperatura superficial se registra mediante sensores de termistor del tipo HOBO-H8 Pro, Pt100, Tecno.EL, etc., y en el resto de los casos se distribuye equitativamente entre sensores de termocupla tipo T, por ejemplo HOBO-U12T, y termómetros IR del tipo TESTO 845. La temperatura de aire exterior e interior ha sido medida mayoritariamente mediante sensores de termistor y termocupla, y sólo en un caso mediante sonda de hilo caliente. En cuanto a las variables meteorológicas la radiación solar ha sido medida mediante solarímetros del tipo SK08, SP-110; la velocidad de viento con sonda de hilo caliente tipo TESTO; y la iluminancia exterior con luxómetro TESTO 545. Además se indica que se ha medido la humedad relativa sin precisar el tipo de equipamiento utilizado (Tabla 1).

Artículo		Tipología SEV	Variables medidas	Equipamiento	Referencia Temporal
Autor	Lugar				
H. Wong 2010	Singapur. Af (Ecuatorial Húmedo)	Paredes Verdes, Fachadas Verdes y sistemas mixtos.	T° Superficiales / T° Aire exterior	Termocupla HOBO U12 / Termistor H8 Pro	Estación: Verano Período: Días claros. T° Superficial 3 días claros de Febrero, Abril y Junio Frecuencia: minuto a minuto, promediado cada una hora.
			Variables meteorológicas: NO		
G. Vox 2018	Bari, Italia. Csa (Templado cálido húmedo)	Fachada verde tipo Doble Piel	T° Superficiales / T° Aire exterior	Termistor HOBO / Termistor Hygroclip S3	Estación: Invierno, Verano. 2 años. Período: 6 días por estación Frecuencia: minuto a minuto, promediado cada 15 minutos.
			Variables meteorológicas: Radiación solar.		
K. Perini 2017	Génova, Italia. Csa (Templado cálido húmedo)	Sistema Mixto. Fachada verde tipo Doble Piel con sustrato.	T° Superficiales / T° Aire exterior e interior	Termistor / Solarímetro RTD Pt100 (Clase A)	Estación: Primavera, Verano, Otoño Período: franja horaria 8 A.M. - 6 P.M. Frecuencia: minuto a minuto, promediado cada 15 minutos.
			Variables meteorológicas: Radiación solar, humedad relativa		
J. Coma 2017	Lleida, España. Csa (Templado cálido húmedo)	Pared Viva y Fachada Verde	T° Superficiales / Consumo eléctrico	Termistor Pt-100 DIN B / Analizador de redes eléctricas MK30LCD-Clase 1	Estación: Verano, Invierno Período: Junio-Julio, Diciembre- Febrero Frecuencia: minuto a minuto, promediado cada 5 minutos.
			Variables meteorológicas: Radiación solar		
G. Pérez 2011	Lleida, España. Csa (Templado cálido húmedo)	Fachada verde tipo Doble Piel	T° Superficiales / T° Aire exterior	Termómetro IR TESTO 845 / Termohigrómetro TESTO 625	Estación: Primavera Período: Abril-Septiembre. 7 días. Frecuencia: 1 vez por semana, 14:00Hs, promedio semanal.
			Variables meteorológicas: Iluminancia solar, humedad relativa y velocidad de viento		
M. Haggag 2014	Al-Ain, Emiratos Árabes. BWh (Clima árido desértico)	Pared Viva tipo paneles modulares	T° Superficiales / T° Aire exterior e interior	Termómetro IR T-type PTFE aislados / Sonda de hilo caliente	Estación: Verano Período: Julio Frecuencia: cada intervalos de 10 minutos.
			Variables meteorológicas: velocidad de viento		
K. Perini 2011	Holanda meridional, Holanda. Cfb (Templado cálido húmedo)	Fachada Verde tradicional, Fachada Verde doble piel, y Pared Viva con macetas modulares.	T° Superficiales / T° Aire exterior	Termómetro IR / Sonda de hilo caliente Testo	Estación: Otoño Período: Septiembre - Octubre Frecuencia: cada 15 segundos, 10 promedios de datos por día.
			Variables meteorológicas: radiación solar		
M. Therese Hoelscher 2016	Berlín, Alemania. Cfb (Templado cálido húmedo)	Fachada Verde tradicional	T° Superficiales / T° Aire exterior	Termistor SKTS 200	Estación: Verano Período (3): 1 - 6 Agosto 2013; 19 Julio - 16 Agosto 2013; Agosto 2013 Frecuencia: cada 15 segundos, 10 promedios de datos por día.
			Variables meteorológicas: Radiación solar, humedad relativa		

Tabla 1: Metodologías experimentales para la evaluación de SEV

En cuanto a los métodos teóricos el 84% corresponde a la evaluación de casos experimentales en condiciones controladas de prototipos de muros, y/o espacios a escala, con SEV respecto a un caso testigo. El resto simula casos reales con y sin SEV ubicados en una zona urbana consolidada, y valida resultados con los obtenidos en condiciones controladas reportados en la literatura internacional. Las variables estudiadas a partir de la simulación de los distintos escenarios fueron: temperatura superficial, evapotranspiración del paquete biológico que conforma el SEV, temperatura del aire exterior e interior, consumo de energía. Y, en menor medida, parámetros meteorológicos como atenuación de la radiación solar y variación de la velocidad y dirección de viento, etc.

La estación del año simulada con mayor frecuencia es el verano (cinco de seis casos), si bien algunos autores evalúan las dos estaciones extremas, y otras estaciones intermedias (dos de seis en ambos casos). El período de simulación es variable, comprendiendo lapsos de tiempo máximos de catorce días, y mínimos de siete días. Sin embargo K.W.D. Kalani (2017) simula períodos de tres meses equivalentes a las mediciones. En relación al software de simulación, en el 50% de los casos se utiliza EnergyPlus, y en el resto se emplea TRNSYS y SOLENE, dependiendo de la escala abordada en la evaluación del impacto del SEV.

Artículo		Tipología SEV	Variables medidas	Software simulador	Referencia Temporal
Autor	Lugar				
R. Djedjig 2015	La Rochelle, Francia; Atenas, Grecia. Cfb (templado cálido húmedo, verano caliente)	Paredes Verdes tipo paneles modulares	T° Superficiales / T° Aire exterior e interior / Consumo de energía Variables meteorológicas: Radiación solar, humedad relativa	TRNSYS Type VegEnvelope	Estación: Verano, Otoño, invierno y Primavera Período: Mayo 2012 - Abril 2013 Frecuencia: muestras cada 5 minutos
L. Malys 2014	Geneva, Suiza. Cfb (templado cálido húmedo, verano caliente)	Sistema Mixto, Fachada verde tipo Doble Piel con sustrato.	T° Superficiales / T° Aire exterior Variables meteorológicas: Radiación solar, humedad relativa, velocidad y dirección de viento	SOLENE Microclimate	Estación: Primavera Período: 14 - 24 de Mayo. 7 días. Frecuencia: hora a hora, promediado cada 24 horas..
S. Flores 2014	Salta, Argentina. Cwa (templado cálido invierno seco, verano caliente)	Fachada Verde tipo doble piel	T° Superficiales / T° Aire exterior Variables meteorológicas: Radiación solar, heliofania, humedad relativa, velocidad de viento	EnergyPlus V7.1	Estación: Verano Período: Diciembre Frecuencia: Hora a hora
S. Flores 2015	Cwa (templado cálido invierno seco, verano caliente)	Fachada Verde tipo doble piel	T° Superficiales / T° Aire exterior e interior Variables meteorológicas: Radiación solar, humedad relativa, velocidad de viento	EnergyPlus V7.1	Estación: Verano, Invierno Período: Junio-Julio, Diciembre- Febrero Frecuencia: minuto a minuto, promediado cada 5 minutos.
R. Djedjig 2016	La Rochelle, Francia / Atenas, Grecia. Cfb (templado cálido húmedo, verano caliente)	Paredes Verdes tipo paneles modulares	T° Superficiales / T° Aire exterior Variables meteorológicas: Radiación solar, humedad relativa	TRNSYS - Herramienta: Building Energy Simulation (BES)	Estación: Verano Período: Agosto 2012 Frecuencia: muestras cada 1/2 segundo, promediado cada 5 minutos.
K. W. D. Kalani 2017	Wuhan / Hong Kong, China, Cfa (templado cálido húmedo, verano caliente)	Pared Viva tipo paneles modulares	T° Superficiales / T° Aire exterior e interior / Consumo de energía Variables meteorológicas: Radiación solar, humedad relativa, velocidad de viento	EnergyPlus (característica EMS)	Estación: Verano Período (2): 25 de Junio (07:00 - 19:00); y Junio-Septiembre Frecuencia: muestreo no especificado, promedios por hora.

Tabla 2: Metodologías teóricas para la evaluación de SEV

Análisis de resultados

El conocimiento generado ha sido discriminado para su análisis en función de las prestaciones de los distintos SEV respecto al siguiente conjunto de variables: Diferencia de temperatura superficial entre muro control y muro con SEV; Diferencia de temperatura ambiente interior; Diferencia de temperatura ambiente exterior; Ahorro energético para el acondicionamiento de espacios interiores (Tabla 3).

	Paredes Vivas								Fachadas verdes								Sistemas Mixtos							
	ΔT° Sup ($^{\circ}$ C)		ΔT° Int ($^{\circ}$ C)		ΔT° Amb Ext		$\$/W-h$ (%)		ΔT° Sup ($^{\circ}$ C)		ΔT° Int ($^{\circ}$ C)		ΔT° Amb Ext		$\$/W-h$ (%)		ΔT° Sup ($^{\circ}$ C)		ΔT° Int ($^{\circ}$ C)		ΔT° Amb Ext		$\$/W-h$ (%)	
	Max	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Max	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Max	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min
Csa - Templado Cálido Verano seco y caliente	21		6					58.9		17.6	5.5					33.8								
Cfa/Cfb - Templado Cálido Húmedo, verano caliente	26.2	20.8	4	1.1	1.5			37	11.9	15.5	5	0.2	0.03					20					26	
CWb - Templado Cálido Desértico, verano caliente	16									8.83														
BWh - Árido desértico verano caliente	13	5	6.5					20.5																
Af - Ecuatorial Húmedo	12	6.4			3.3			31	10	4.5				0.2				9						

Tabla 3: Resultados

Diferencia de temperatura superficial entre caso testigo y caso con SEV

Dentro de las 3 tipologías analizadas, las fachadas verdes muestran un rango de disminución de la temperatura superficial que oscila entre 4.5 $^{\circ}$ C y 17.5 $^{\circ}$ C. Alcanzan las máximas diferencias en climas del tipo Csa (Templado cálido, verano seco y caliente) y las mínimas en climas del tipo Af (Ecuatorial húmedo). En el sistema de paredes vivas se observa un rango de disminución de la temperatura superficial que varía entre 5 $^{\circ}$ C y 26 $^{\circ}$ C, alcanzando la máxima diferencia en climas del tipo Cfa/Cfb (templado cálido húmedo, verano caliente) y la mínima diferencia en climas del tipo BWh (árido desértico, verano caliente). Respecto a los Sistemas Mixtos se verifica un rango de disminución de temperatura superficial que varía entre 9 $^{\circ}$ C y 20 $^{\circ}$ C, donde las máximas diferencias se registran en climas del tipo Cfa/Cfb (templado cálidos húmedos, verano caliente) y las mínimas diferencias en climas del tipo Af (Ecuatorial húmedo).

Diferencia de temperatura interior entre caso testigo y caso con SEV

En los trabajos analizados, las diferencias de temperatura interior han sido evaluadas para los sistemas de Fachadas Verdes y Paredes Vivas. El impacto de las Fachadas Verdes en la temperatura interior ha sido sólo analizado en climas del tipo Cfa/Cfb (templado cálidos húmedos, verano caliente) y no muestra una diferencia representativa respecto al caso testigo (< 0.2 $^{\circ}$ C). En cuanto a los sistemas de Paredes Vivas, se observan diferencias de temperatura en un rango comprendido entre 1.1 $^{\circ}$ C y 6.5 $^{\circ}$ C, alcanzando la mínima diferencia en climas del tipo Cfa/Cfb (templado cálidos húmedos, verano caliente) y la máxima diferencia en climas del tipo BWh (árido desértico, verano caliente). La contrastación del efecto de ambos sistemas sobre las temperaturas interiores en climas del tipo Cfa/Cfb (templado cálidos húmedos, verano caliente) muestran que en el caso de Paredes Vivas alcanzan diferencias máximas de 4 $^{\circ}$ C y en el caso de las Fachadas Verdes no se verifica ningún impacto.

Diferencia de temperatura exterior entre caso testigo y caso con SEV

Al igual que en el caso del análisis de las diferencias de temperatura interior entre el caso testigo y los casos con SEV, el análisis de la variable de temperatura exterior se ha efectuado sólo con sistemas de Fachadas Verdes y Paredes Vivas. Las Fachadas Verdes muestran una disminución máxima de la temperatura exterior entre caso testigo y caso con SEV de 3 $^{\circ}$ C para climas del tipo Cfa/Cfb (templado cálidos húmedos, verano caliente) y equilibrio térmico para climas del tipo Af (Ecuatorial húmedo).

En Paredes Vivas, se observan diferencias de temperatura en un rango comprendido entre 1.5 °C y 3.3 °C, alcanzando la mínima diferencia en climas del tipo Cfa/Cfb (templado cálidos húmedos, verano caliente) y la máxima diferencia en climas del tipo Af (Ecuatorial húmedo).

Reducción de consumo energético en espacios interiores entre caso testigo y caso con SEV

La reducción de consumo energético para enfriamiento ha sido evaluada en las tres tipologías de SEV. El análisis de la variable en relación a espacios interiores que presentan en su envolvente Fachadas Verdes, muestra una reducción en el consumo de energía del orden del 33.8% para climas del tipo Csa (Templado cálido, verano seco y caliente). En el sistema de Paredes Vivas se observa un rango de reducción de consumo de energía que oscila entre 10% y 58.9%, alcanzando la mínima reducción en climas del tipo Af (Ecuatorial húmedo), y la máxima en climas del tipo Csa (Templado cálido, verano seco y caliente). El impacto de los Sistemas Mixtos en el consumo de energía ha sido abordado solamente en climas del tipo Cfa/Cfb (templado cálidos húmedos, verano caliente) alcanzando reducciones del orden del 26%.

CONCLUSIONES

El análisis bibliográfico realizado muestra que mayoritariamente los estudios se han realizado en países europeos en climas del tipo templado cálido, tanto húmedo como seco -Csa, Cfa/Cfb-, siendo los sistemas más estudiados las Paredes Vivas con tipología de paneles modulares. Y que el desarrollo del conocimiento registra un crecimiento positivo durante la última década. Sin embargo, son escasos los estudios referidos al impacto de los SEV en climas desérticos. Esto avala la importancia de su abordaje en ciudades intermedias de zonas áridas.

En el abordaje metodológico se utilizan tanto métodos experimentales –mayoritariamente en condiciones controladas-, como métodos teóricos, basados en la simulación de prototipos de muros y/o espacios a escala. Se observa que la mayoría de los estudios se realizan durante el verano, dado que el impacto de los SEV parecería ser de mayor relevancia sobre las cargas de refrigeración que sobre las de calefacción debido al incremento de la transferencia de calor como consecuencia de la evapotranspiración del paquete biológico y el efecto de sombreado sobre la envolvente edilicia.

Los resultados recopilados permiten concluir en que las Paredes Vivas muestran ser el sistema más eficiente, y la magnitud del impacto depende del tipo de clima. Alcanzan las mayores diferencias de temperatura superficial -26.2 °C- en climas del tipo Cfa/Cfb (templado cálidos húmedos, verano caliente), de temperatura interior -6.5 °C- en climas del tipo BWh (árido desértico, verano caliente), de temperatura exterior -3.3 °C- en climas del tipo Af (Ecuatorial húmedo) y los mayores ahorros energéticos -58.9 %- en climas del tipo Csa (Templado cálido, verano seco y caliente).

Si bien las Fachadas Verdes constituyen una alternativa de aplicación a envolventes edilicias de menor complejidad tecnológica, son menos eficientes, alcanzando diferencias máximas de temperatura superficial del orden de 17.5 °C y reducciones en el consumo de energía del 33% en climas del tipo Csa (Templado cálido, verano seco y caliente). Y no se registran impactos positivos en las temperaturas interiores en climas del tipo Cfa/Cfb (templado cálidos húmedos, verano caliente).

En lo concerniente a los Sistemas Mixtos, muestran eficiencias intermedias con diferencias de temperatura superficial del orden de los 20 °C (Paredes Vivas 26 °C; Fachadas Verdes 15.5 °C) y reducciones de consumo de energía del 26% (Paredes Vivas 37%) en climas del tipo Cfa/Cfb (templado cálidos húmedos, verano caliente).

De lo discutido previamente se desprende que la temática ha crecido en función de su relevancia a nivel mundial en la última década. Asimismo, muestra probada eficiencia en la disminución de las temperaturas de los espacios habitables exteriores e interiores y sus consecuentes impactos en los consumos de energía. Esto avala la importancia de generar conocimiento a nivel local con el objeto de profundizar el estudio de los SEV en climas del tipo desértico, rasgo dominante de la ciudad de

Mendoza, y evaluar su potencial de adecuación a las características morfológicas y tecnológicas de los edificios y sus beneficios termo-energéticos a escala urbana y edilicia.

REFERENCIAS

- Akbari, H. et al (1997). Peak power and cooling energy savings of high-albedo roofs. *Energy Build* 25, 117–126.
- Bórmida, E. (1984). Mendoza: modelo de ciudad-oasis. *Revista de la Universidad de Mendoza*. 68–71.
- 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* 103, 682–703.
- Coma, J. y et al (2014). New Green Facades as Passive Systems for Energy Savings on Buildings. *Energy Procedia* 57, 1851-1859.
- Coma, J. y et al (2017). Vertical greenery systems for energy savings in buildings: A comparative study between green walls and green facades. *Building and Environment* 111, 228-237.
- Correa, E. N. (2006). Isla de Calor Urbana. El caso del área metropolitana de Mendoza. Tesis doctoral en Ciencias, Área Energías Renovables. Fac. de Ciencias Exactas. Universidad Nacional de Salta. Salta-Argentina.
- Djedjig, R. y et al (2015). Analysis of thermal effects of vegetated envelopes: Integration of a validated model in a building energy simulation program. *Energy and Buildings* 86, 93-103.
- Djedjig, R. y et al (2016). Modeling green wall interactions with street canyons for building energy simulation in urban context. *Urban Climate* 16, 75-85.
- Doulos L. y et al (2004). Passive cooling of outdoor urban spaces: The role of materials. *Solar Energy* 77 (2): 231-249.
- Flores Larsen S. y et al (2014). Thermal Simulation of a Double Skin Façade with Plants. *Energy Procedia* 57, 1763-1772.
- Flores Larsen S. y et al (2015). Modeling double skin green façades with traditional thermal simulation software. *Solar Energy* 121, 56-67.
- Haggag M. y et al (2014). Experimental study on reduced heat gain through green façades in a high heat load climate. *Energy and Buildings* 82, 668-674.
- Hoelscher M. T. y et al (2016). Quantifying cooling effects of facade greening: Shading, transpiration and insulation. *Energy and Buildings* 114, 283-290.
- Kalani K.W.D. (2017). Studying the potential of energy saving through vertical greenery systems: Using EnergyPlus simulation program. *Energy and Buildings* 138, 47-59.
- Malys M y et al (2014). A hydrothermal model to assess the impact of green walls on urban microclimate and building energy consumption. *Building and Environment* 73, 187-197.
- Pérez G. y et al (2011). Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings. *Applied Energy* 88, 4854-4859.
- Perini, K. (2011). Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope. *Building and Environment* 46, 2287- 2294.
- Perini K. y et al (2017). The use of vertical greening systems to reduce the energy demand for air conditioning. Field monitoring in Mediterranean climate. *Energy and Buildings* 143, 35-42.
- Saracevic T. (1999). Information Science. *Journal of the American Society for Information Science*, vol. 50, n° 12, p. 1060
- Vox G. y et al (2018). Green façades to control wall surface temperature in buildings. *Building and Environment* 129, 154-166.
- Wong N. y et al (2010). Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Building and Environment* 45, 663-672.

ABSTRACT

This paper evaluates the potential of Vertical Greenery Systems (VGS) as regulators of thermal-energetic conditions of the urban and building spaces. Different aspects of the knowledge of last decade are analyzed systematically: geographic and climatic distribution, VGS categories, methods and results. The thematic has grown at a worldwide level and shows efficiency in decreasing internal

and external temperatures of habitable spaces and energy consumption, whose magnitude depends of the climate. Living Walls are the most efficient system, generating maximum decreases of 6.5 °C in the interior temperature, 3.3 °C in the exterior temperature, 26 °C in the surface temperature and 59% of the energy consumption. This endorse the generation of local knowledge associate to the thermal-energetic benefits of VGS in deserted climates and his adequacy to the morphologic and technologic characteristics of buildings in Mendoza.

Keywords: Vertical Greenery Systems; thermal-energetic efficiency; arid climates.