



Estabilización térmica de espacios agro-productivos a partir de un sistema solar pasivo modular con variaciones de la masa térmica

Agro production spaces thermal stabilization from a modular passive solar system with thermal mass variations

Viegas Graciela Melisa

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
Universidad Nacional de La Plata, Argentina
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido
Correo: gachiviegas@yahoo.com.ar
<https://orcid.org/0000-0001-6248-4678>

Jodra Juan Ignacio

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
Universidad Nacional de La Plata, Argentina
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido
Correo: juanjodra@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-9410-3494>

Discoli Carlos Alberto

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
Universidad Nacional de La Plata, Argentina
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido
Correo: discoli@rocketmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-6944-5492>

San Juan Gustavo Alberto

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
Universidad Nacional de La Plata, Argentina
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido
Correo: gustavosanjuan60@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-8924-9918>

Resumen

Los ámbitos destinados a la agroproducción se resuelven frecuentemente con estructuras livianas. En su interior se presentan condiciones de picos de temperatura que afectan a los cultivos produciendo enfriamiento o sobrecalentamiento. En este contexto, el presente trabajo presenta la comparación del comportamiento térmico interior de un invernadero liviano vacío y con la incorporación de un sistema pasivo acumulador, amortiguador térmico, modular, industrializable y versátil para configurar diferentes condiciones de carga térmica y estabilizar su temperatura. El sistema presenta dos versiones, solo con materialidad sólida, y combinando la misma con agua encapsulada, presentado los beneficios de su incorporación. En este contexto, el trabajo tiene por objetivo profundizar en la evaluación de una solución tecnológica solar pasiva para climatización de espacios agroproductivos, a través de comparar la respuesta térmica, la carga y el aporte térmico en el uso de variantes de masa únicamente sólida; y masa mixta sólida y líquida (hormigón y agua). La metodología desarrolla la fabricación, instalación y ensayo en laboratorio de un invernadero con la incorporación de mesas de cultivo construidas con los sistemas acumuladores/amortiguadores térmicos para su comparación. Los resultados muestran que los aportes térmicos máximos de los sistemas se cuantificaron en 17 MJ, 32 MJ y 36 MJ en los sistemas sólidos de 864 kg, sólido de 1968 kg y mixto de 864 kg, respectivamente. Se logra aproximadamente el doble del aporte térmico que provee el sistema más liviano, ya sea por aumento de masa sólida como por reemplazo de igual masa sólida por mixta. Asimismo los costos de los sistemas se registran como 17.1 USD/MJ; 20.7 USD/MJ y 9 USD/MJ para el sistema sólido de 864 kg, sólido de 1968 kg y mixto de 864 kg, respectivamente, demostrando la reducción de costos en el sistema mixto respecto a los demás.

Descriptor: Energías renovables, sistemas solares pasivos, acumulador-amortiguador térmico, almacenamiento de energía, espacios agro-productivos.

Abstract

Agro production areas are often solved with light structures. Inside them there are temperature peak conditions that affect the crops by producing cooling or overheating. In this context, this work presents the comparison of the internal thermal behavior of an empty light greenhouse with the incorporation of a passive accumulator system, a versatile, and possible to be industrialized, modular thermal buffer which can set up different thermal load conditions and stabilize its temperature. The system is presented in two versions, one only with solid materiality, and the other combining it with encapsulated water, thus showing the benefits for its incorporation. The present work aims to deepen the assessment of a passive solar technological solution for air conditioning in agro production spaces, by comparing the thermal response, the load and the thermal contribution in the use of only solid mass variants with that of mixed solid and liquid mass (concrete and water). The methodology develops the manufacturing, installation and laboratory testing of a greenhouse with the incorporation of cultivation tables built with thermal accumulator/buffer systems for comparison. The results show that the maximum thermal contributions of the systems were quantified in 17 MJ, 32 MJ and 36 MJ for the 864 kg solid system, the 1968 kg solid one and the 864 kg mixed one respectively. The thermal contribution achieved approximately doubles that of the lighter system either by increasing solid mass or by replacing the same solid mass by mixed mass. The costs of the systems are recorded as 17.1 USD/MJ; 20.7 USD/MJ and 9 USD/MJ for the 864 kg solid system, the 1968 kg solid one and the 864 kg mixed one respectively, showing in this way the cost reduction in the mixed system when compared to the others.

Keywords: Renewable energy, passive solar systems, thermal buffer, heat storage system, agro-production spaces.

INTRODUCCIÓN

El cultivo a cielo abierto depende de las condiciones climáticas externas. Se expone a eventos meteorológicos adversos como granizos, lluvias y vientos muy intensos, y temperaturas extremas (altas o bajas). Frente a esta situación los invernaderos permiten controlar estos parámetros para proteger las plantaciones y favorecer el cultivo en contraestaciones y la incorporación de otros cultivos. Si bien mejoran las condiciones térmicas, requieren un control específico que conlleva a invertir en instalaciones complementarias (tales como sistemas de sombreado/ventilación, medias sombras con exo-estructuras tensadas); desarrollar estrategias orientadas a generar microclimas; y utilizar energía convencional con costos adicionales para la producción. En relación con este último aspecto, se utiliza la ignición directa de combustibles sólidos, líquidos, gaseosos y biomasa para climatización. Asimismo requieren ventilación para refrescar el ambiente. Según el caso, se asocian a estas prácticas diferentes problemáticas como contaminación del espacio de cultivo por combustión incompleta, riesgo de incendio, escaso control de la temperatura y baja eficiencia energética (Ferrato & Pannelo, 2003). En nuestro caso de estudio, el cinturón hortícola de La Plata (Bs AS, Argentina), el cual se ha convertido en el más grande del país en los últimos veinte años, los invernaderos livianos se utilizan de manera generalizada, como un requerimiento para la competitividad en el mercado (Simonatto, 2000). Se estima que la superficie cubierta por invernaderos en la región es de 8000 hectáreas. Las problemáticas planteadas afectan en mayor medida a los pequeños productores (que cultivan de 2 a 7 ha), ya que al contar con menores recursos, deben desarrollar estrategias de subsistencia con una mano de obra principalmente familiar y un parque de herramientas y equipamiento limitado y de menor nivel tecnológico, planteándose la necesidad de buscar soluciones sencillas y versátiles para mejorar estas condiciones (Ringuet & Garat, 2000; Waisman, 2011). Así mismo, otro factor condicionante para la inversión en infraestructura y tecnología radica en el régimen de tenencia de la tierra. Se trata de arrendamientos informales e inestables que desmotivan a los productores para la inversión e instalación de equipamientos tecnológicos fijos.

SISTEMAS SOLARES PASIVOS APLICADOS A ESPACIOS AGROPRODUCTIVOS

A pesar de que los sistemas convencionales son los más difundidos en nuestra región para climatizar los espacios agro-productivos, también se han desarrollado tec-

nologías “híbridas”, que combinan el aprovechamiento del recurso solar con *sistemas activos* de bombeo o ventiladores abastecidos por *energías convencionales* para la circulación de un caudal de agua (Suárez, 2012), o aire como fluidos de intercambio (Juanicó *et al.*, 2011; Condorí *et al.*, 2009). En su mayoría utilizan reservorios térmicos auxiliares para la captación y acumulación de energía térmica por ganancia solar directa o colectores externos al espacio de producción.

Por otra parte, existen antecedentes tecnológicos que utilizan elementos de acumulación térmica con elevada capacidad calorífica, la cual se distribuye en el interior del espacio de producción. La masa de acumulación absorbe la energía, con lo cual reduce la temperatura del espacio durante el periodo diurno, y además la conserva para luego entregarla durante la noche. Resulta una tecnología efectiva para estabilizar ambientes y minimizar costos de la energía demandada para tal fin. El origen de estas tecnologías se remonta a la climatización de viviendas en el año 1881 (Morse, 1881), y posteriormente en la década de 1960 se difundieron bajo el nombre de “muros Trombe-Michel” (Trombe & Michel, 1971). En la década de 1980 se establecieron criterios básicos para su implementación sistemática en edificios (Balcomb & Hedsstrom, 1980), y se avanzó en estudios tecnológicos que relacionaron la masa de acumulación con el clima, la demanda, los materiales y sus capacidades de carga de energía (Divecchia & Ruggi, 1979; Zalewski *et al.*, 2012; Bourdeau *et al.*, 1980; Lesino *et al.*, 1978; Guerrero *et al.*, 1984; Alanis *et al.*, 1978; Urriol, 1980).

Si nos enfocamos en los antecedentes sobre tecnologías solares pasivas en espacios agroproductivos, se observan variados antecedentes. En China se utiliza una pared lateral másica aislada como borde de un invernadero solar pasivo, el cual tiene aislamiento nocturno orientado hacia el ecuador (Li *et al.*, 2010). En Argentina, se utilizan materiales de descarte para conformar muros inercializadores térmicos utilizando agua como masa de acumulación térmica (Esteves & Gelardi, 1999). En Tunes, Bouadila *et al.* (2014a) evaluaron el clima interior de un invernadero de vidrio (clima mediterráneo), incorporando un calentador solar de aire, observándose que en invierno la temperatura base se elevaba en 5 °C y se reducía la humedad relativa de un 10 a 20 % durante la noche. En otra investigación los autores Bouadila *et al.* (2014b) observaron que el calor recuperado durante la noche en un invernadero provisto de un sistema solar pasivo con un sistema acumulador de calor latente era 30 % del total necesario. Por otro lado, en Lazaar *et al.* (2015) se comparó el uso de calentadores convencionales versus calentadores solares pasivos incorporados en invernaderos y se concluyó que los siste-

mas solares aseguraron temperaturas nocturnas de aire de 12 °C y de suelo de 16 °C, deseables para el cultivo. En Kooli *et al.* (2015) se analizaron los beneficios de incorporar obturadores solares en un invernadero agrícola aislado y equipado con un calentador solar de aire con energía de almacenamiento latente, observando que la temperatura nocturna se mantuvo en 15 °C mientras que en el exterior era de 8 °C y que se elevó 2 °C, respecto del invernadero sin equipo solar ni obturador. En sus investigaciones Attar *et al.* (2013) concluyeron que un colector solar plano para calefaccionar invernaderos, es un sistema rentable, no contaminante, que reduce el consumo de energía, pero no logra por sí solo cumplir los requisitos totales de calefacción debiendo utilizar un sistema convencional. Sin embargo, más adelante Attar & Farhat (2015) evaluaron la eficiencia de un calentador solar de agua para mejorar el clima interior de un invernadero en Túnez, utilizando el suelo como acumulador de calor, observando que para invernaderos pequeños de 10 m³ el sistema pudo abastecer las necesidades térmicas. En Bellos *et al.* (2016) se realizó una comparación entre un muro trombe tradicional, uno innovador que incorporó una ventana interior y una pared aislada, para la localidad de Atenas, Grecia. Los resultados demostraron que el sistema tradicional alcanza 18 °C en el aire interior, el trombe innovador lo eleva 0.5 °C durante todo el año, mientras que sin los sistemas y aislando la pared llega solo a 14 °C en el interior. En Jovanovic *et al.* (2017) se analizan las potencialidades de integrar energías renovables en edificios de baja energía, y específicamente analizan la combinación de muros trombe con sistemas fotovoltaicos. En Baïri *et al.* (2020) se analizan mejoras en los muros trombe a partir de incorporar particiones verticales transparentes para generar compartimientos y mejorar la ventilación natural, obteniéndose aumentos en la transferencia de calor por convección natural entre 10.0 % y 14.4 %.

Respecto a las masas de acumulación mixtas se han observado escasos estudios, los cuales se orientan al uso residencial. En uno de ellos se destaca un ahorro de energía anual del 8.6 % y una mejora del índice de evaluación del confort térmico interior de un 12.9 %. Además, se observó que el agua responde correctamente a los climas intermedios (Wang *et al.*, 2013). Asimismo, en Kaushik & Kaul (1989), se utilizó el agua encapsulada en el hormigón para aprovechar su bajo costo y su gran capacidad calorífica. En Viegas *et al.* (2018), se desarrolló un sistema de calefacción en viviendas utilizando hormigón y agua encapsulada, a partir de piezas modulares de elevado peso, que presentó un mejor desempeño que los muros máxicos sólidos. En Zhou *et al.* (2020) se muestran los beneficios de incorporar un

muro de agua (a baja temperatura) por delante de un muro máxico para mejorar la climatización. Se destaca que tiene mejor rendimiento diurno y reduce la pérdida de calor durante la noche. En conclusión, la eficiencia del muro de agua es superior a la del muro máxico. Si bien todos los sistemas relevados han demostrado eficacia, presentan falencias en cuanto a ciertos requerimientos de los espacios agro-productivos. Finalmente en Jodra *et al.* (2017 y 2018) se presentó un sistema modular amortiguador, acumulador térmico que permitió mejorar las condiciones interiores tanto de espacios residenciales como agro-productivos. Los primeros ensayos muestran la factibilidad de este sistema.

La revisión bibliográfica demostró la gran variedad de soluciones y los beneficios del uso de la masa térmica en invernaderos livianos, a partir de masas de acumulación sólidas o de agua. Sin embargo, son escasos los antecedentes que combinen y comparen ambos materiales aplicados al ámbito de la agro-producción y que respondan a las necesidades locales mencionadas, respecto a la versatilidad y la facilidad de traslado, presentándose como un área de interés para avanzar en el conocimiento. Desarrollos previos permitieron evaluar la factibilidad constructiva del agua encapsulada como material para estabilizar ambientes agroproductivos. En este contexto, el presente trabajo tiene por objetivo avanzar en la evaluación de una solución tecnológica solar pasiva para climatización de espacios agro-productivos, a partir de comparar el comportamiento térmico, la carga, el aporte térmico residual y los costos de diferentes configuraciones de la masa de acumulación sólida y mixta (hormigón y agua).

METODOLOGÍA

A continuación se presenta la región de implantación, las definiciones tecnológicas de los sistemas desarrollados, los materiales y métodos.

REGIÓN CLIMÁTICA DE IMPLANTACIÓN

La localización geográfica del trabajo corresponde al cordón agro-productivo del Gran La Plata (23 msnm, lat 35 °S, long. 57,9 °O), provincia de Buenos Aires, Argentina. Su clima se define como templado cálido húmedo (IRAM, 1996) y las características promedio se presentan en Tabla 1.

Tabla 1. Condiciones climáticas medias de invierno de la ciudad de La Plata (provincia de Buenos Aires, Argentina)

	T media (°C)	T máxima (°C)	T mínima (°C)	Humedad relativa (%)	Precipitaciones (mm)	Grados día invierno (temp. base 18 °C)
La Plata	9.7	15	5.5	82	59	1178

DEFINICIÓN TECNOLÓGICA DE LOS SISTEMAS

Se trata de un sistema modular basado en bloques pre-moldeados manipulables de hormigón y vainas de agua estancas. Es un sistema armable *in situ* y adaptable a diferentes demandas térmicas y espaciales (ámbitos de uso humano o productivos). Para ello se presentan en la Figura 1, dos posibles configuraciones del sistema con tubos escondidos o con tubos expuestos y dos variantes para su aplicación en un espacio productivo, muros laterales o mesadas de trabajo internas.

El agua está contenida dentro vainas estancas de diferentes tamaños conformadas por tubos y tapas plásticas comerciales de 160 mm de diámetro (policloruro de vinilo o similar). Los tubos se llenan dejando 2 % del volumen de aire para absorber los cambios por dilatación térmica y se incorpora una dosificación preventiva de alguicida (2 ml cada 100 l de agua).

En la Figura 2 se observa el diseño geométrico de las piezas sólidas del prototipo ensayado. La masa de hormigón H30 (hormigón con resistencia característica a los 28 días de 300 Kg/ cm²) fue pigmentada integralmente con negro de humo, debido a que mejora sus capacidades termo físicas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo tiene por objetivo establecer la versatilidad del sistema frente a diferentes masas y materialidades, comparando el funcionamiento de un invernadero vacío respecto a uno al que se le incorporan piezas de materialidad sólida y de materialidad mixta.

El invernadero cuenta con un área cubierta de 9 m² y fue construido utilizando estructura metálica tubular sobre la que se instaló la cubierta de polietileno. Para la misma se utilizó film de 200 micrones de espesor de

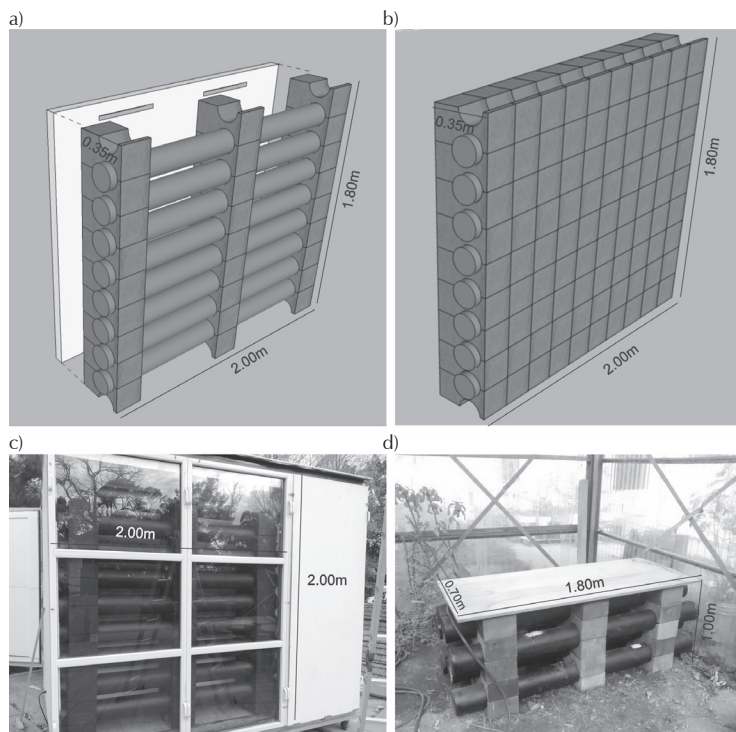


Figura 1. Configuraciones del sistema: a) con tubos expuestos, b) con tubos escondidos, c) desarrollado como muro lateral o d) como mesada de trabajo

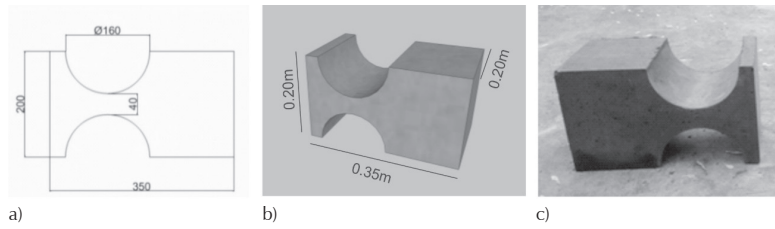


Figura 2. Geometría de las piezas de hormigón: a) vista, b) perspectiva, c) bloque construido

tipo LD (sin tratamiento para retención de la radiación infrarroja), el cual es ampliamente utilizado en el cordón agro-productivo del Gran La Plata debido a su bajo costo. Cabe mencionar que según sus dimensiones, se verificó el Factor de Área Envolvente/Piso (FAEP) con un valor de $3.53 \text{ m}^2/\text{m}^2$, correspondiente al rango de valores estándar en invernaderos de tamaño pequeño y mediano (Esteves *et al.*, 1997).

El ensayo se realizó en agosto de 2016 durante 4 ciclos. Ciclo 1: invernadero sin masa térmica; ciclo 2: Invernadero con sistema de materialidad sólida de 864 kg, conformada por los bloques de hormigón; ciclo 3: Invernadero con sistema de materialidad sólida de 1968 kg, conformada por los bloques de hormigón; ciclo 4: Invernadero con sistema de materialidad mixta de 864 kg de masa conformada por bloques sólidos de hormigón

y vainas de PVC estancas cargadas. La Tabla 2 indica los valores de masa y capacidad calorífica incorporadas en cada caso.

La instrumentación se resolvió mediante el uso de adquisidores de datos marca HOBO, registrándose los siguientes parámetros: temperatura exterior, temperatura de aire interior, temperatura de bloques y temperatura del agua. Los datos climáticos y de radiación se obtuvieron a través de una central meteorológica *Davis Vantage PRO 2*, localizada en el sector de medición.

En la Figura 3, se muestran imágenes de las tres configuraciones a ensayar y detalles de la inserción de los termistores en los bloques y en los tubos de agua.

Para el análisis del ensayo se seleccionaron los días con niveles de irradiación mayores a 80 % del máximo registrado. Dado que los días de ensayos no reprodu-

Tabla 2. Características de los sistemas de acumulación-amortiguamiento sólidos y mixtos

	Ciclo 2: Sistema sólido 864 kg	Ciclo 3: Sistema sólido 1968 kg	Ciclo 4: Sistema mixto 864 kg
Ensayos: Inicio	12/08/2016	18/08/2016	25/08/2016
Fin	17/08/2016	23/08/2016	05/09/2016
Masa [kg]	864	1968	624
Hormigón [Núm. bloques]	36	82	26
Capacidad calorífica [kJ/K]	795	1810	574
Volumen [m ³]	0.393	0.895	0.284
Capacidad calorífica volumétrica [kJ/m ³ K]	2024	2024	2024
Agua [Núm. tubos]	0	0	6
Masa [kg]	0	0	240
Capacidad calorífica [kJ/K]			1004.64
Volumen [m ³]	0	0	0.24
Capacidad calorífica volumétrica [kJ/m ³ K]	0	0	4186
TOTAL			
Masa [kg]	864	1968	864
Capacidad calorífica [kJ/K]	795	1810	1579
Capacidad calorífica volumétrica [kJ/m ³ K]	2024	2024	3013

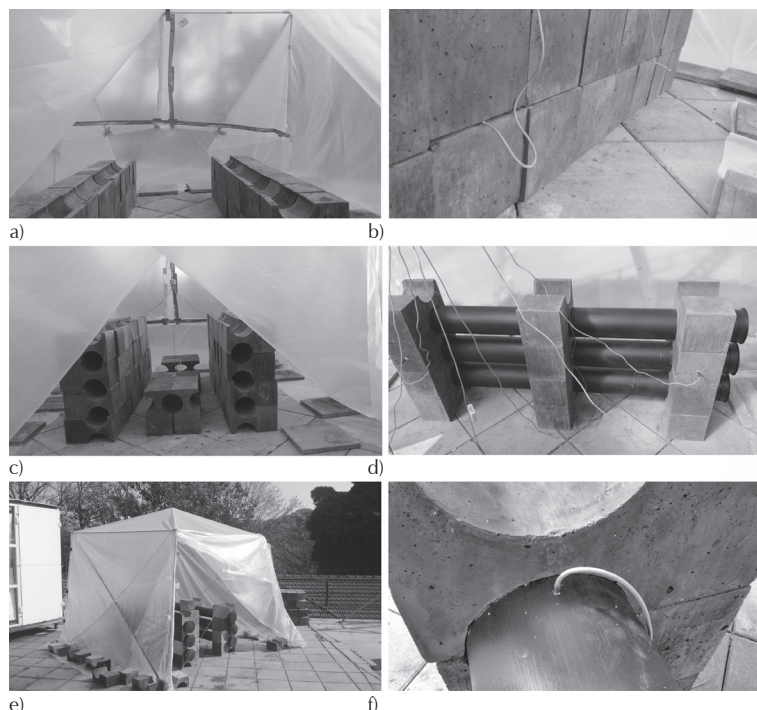


Figura 3. Invernadero con: a) sistema sólido de 864 kg, b) sólido de 1968 kg, c) mixto de 864 kg, d) detalle de termistores en bloques, e) termistores en el conjunto y f) termistores en el tubo de agua

cen los mismos parámetros climáticos (temperatura exterior e irradiación) entre una medición y la subsiguiente, se trabajó también con una variable indirecta de temperatura relativa (Tr) definida como:

$$Tr (\%) = T_{int} / T_{ext} \cdot 100 \% \quad (1)$$

Para el cálculo del aporte térmico se registraron para cada ciclo diario las temperaturas máximas y mínimas medidas en los bloques (en el sistema sólido) y también en el agua encapsulada (en el sistema mixto), así como también la temperatura mínima del aire interior. Con estos datos y la capacidad calorífica de cada componente calculada en la Tabla 2, se aplicó la ecuación:

$$C.aportado(MJ) = Cp * \frac{T_{max} - T_{min}}{1000} \quad (2)$$

Para el cálculo de la carga térmica residual se aplica la misma fórmula utilizando la temperatura mínima de los bloques y la temperatura del aire interior al amanecer.

Finalmente para el análisis térmico-económico se suman los costos de cada componente del sistema expresados en dólares y se calcula el costo energético:

$$C.En. = \frac{Costo\ sistema\ u\$\$}{C.aportado\ (M)} \quad (3)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados obtenidos de los ensayos, cálculos de los aportes térmicos y eficiencia térmico-económica.

ANÁLISIS TÉRMICO COMPARADO ENTRE LA SITUACIÓN BASE, EL SISTEMA SÓLIDO Y MIXTO A IGUALDAD DE MASA TÉRMICA

En la Figura 4 se muestra el análisis comparado entre la situación base y los sistemas sólido de 864 kg y mixto de 864 kg, implementando la variable indirecta de temperatura relativa (Tr).

Para la situación base, el aire interior del invernadero manifiesta una gran amplitud térmica. Con la incorporación del sistema sólido de 864 kg se minimiza la situación de “pico” (fase de carga) en 40 %, evitando el sobrecalentamiento del invernadero y estabilizando en situación de “valle” (fase de descarga) la temperatura final entre un 10 y un 20 % por encima de la registrada para la situación base, evitando el sub enfriamiento en el período nocturno. Con la incorporación del sistema mixto se observa que la situación de “pico” se minimiza entre un 70 % y un 90 % respecto a la situación base, mientras que en la situación de “valle” las temperaturas se estabilizan, manteniendo el nivel térmico interior en el espacio hasta un 35 % más que la situación base y evitando el enfriamiento nocturno. En síntesis, ambos sistemas a igual masa total presentan beneficios sustan-

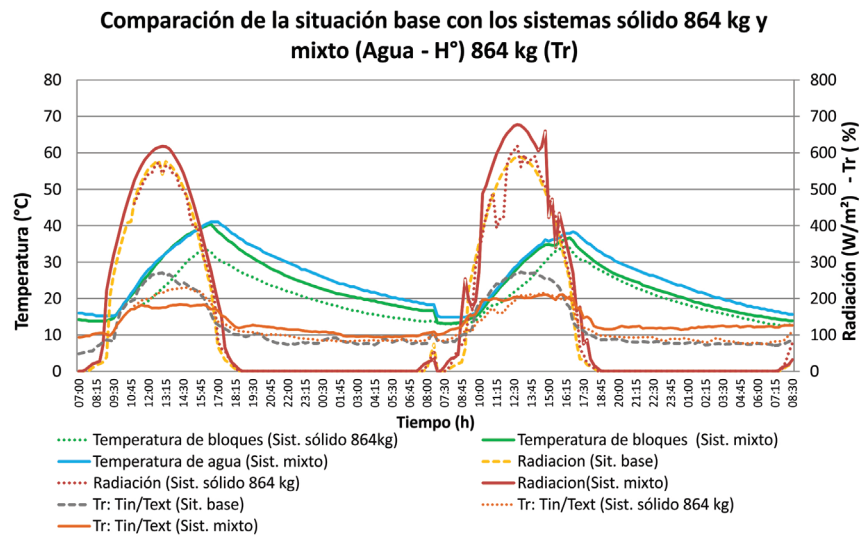


Figura 4. Amortiguamiento de la situación base, con el sistema de materialidad sólida y de materialidad mixta a igualdad de masa (864 kg)

ciales en el mantenimiento térmico interior, amortiguando las temperaturas del aire, reduciendo las diferencias entre las máximas y las mínimas temperaturas. Sin embargo, las mejoras en la materialidad mixta son de entre 30 y 50 % mayores en la reducción de los picos que en el sistema sólido, y 20 % más en la reducción de los valles.

En cuanto a la dinámica de carga y descarga del sistema sólido, se puede observar que los bloques registran un estado térmico de entre 33 °C y 34 °C mientras que al finalizar la descarga se encuentran en ambos ciclos en 14 °C, una vez atemperando el ambiente. En el sistema mixto, se observa que las pendientes de las curvas de temperatura de ambos materiales (bloques de hormigón y vainas con agua), son similares. Durante la fase de carga, si bien las curvas están prácticamente superpuestas, la masa líquida alcanza una mayor temperatura final (entre 1 °C y 2 °C). En la descarga, si bien las diferencias son mayores, los bloques de hormigón y las vainas de agua intercambian calor al ambiente de igual forma.

CÁLCULO DE APOORTE Y CARGA TÉRMICA RESIDUAL DE LOS SISTEMAS

En la Tabla 3 se observan las temperaturas mínimas y máximas de la situación base, mientras que en las Tablas 4, 5 y 6 se muestran las temperaturas de los sistemas, el cálculo del aporte térmico hacia el ambiente y la carga térmica residual del mismo en función de la temperatura del aire interior del invernadero antes del amanecer.

Se puede observar que a igual masa de acumulación el aporte neto del sistema mixto es mayor (Tabla 6), al-

canzando 210 % más respecto al sistema sólido de 864 kg (Tabla 4) (36.1 MJ contra 17 MJ en el sistema sólido) y 112 % más respecto al sistema sólido de 1968 kg (31.9 MJ). Dicha diferencia se manifiesta en el sostenimiento de una mayor temperatura relativa interior/exterior (T_r) durante la fase nocturna, con diferencias de entre 10 y 40 % en los días comparados. Si bien se trata de la misma masa total, la mayor capacidad calorífica del agua respecto al hormigón, permite una acumulación térmica mayor. Comparativamente, la capacidad calorífica promedio del sistema mixto alcanza un valor global de 200 % respecto al sólido de igual masa.

Cuando los sistemas se encuentran en régimen, la descarga transcurre durante el periodo nocturno quedando una cantidad de energía remanente. Para el caso del sistema sólido de 864 kg es entre 2.7 MJ y 3.4 MJ. Para el caso del sistema mixto es alrededor de 7 MJ. Para el caso del sistema sólido de 1968 kg es entre 5.6 MJ y 13 MJ, superando al sistema mixto. Esta energía estaría disponible para ser utilizada durante las primeras horas de un día nublado con predominancia de radiación difusa.

Finalmente, podemos analizar la situación térmica interior comparándola con la requerida para la producción de hortalizas, que se encuentra entre 10 a 15 °C de mínima y 30 °C de máxima. Respecto a las mínimas interiores alcanzadas podemos observar que frente a temperaturas exteriores similares en las cuatro mediciones (7.1 °C; 9.1 °C; 7.8 °C; 8.7 °C para la situación base, el sistema sólido de 864 kg, el sistema sólido de 1968 kg y el sistema mixto de 864 kg, respectivamente), solo el sistema mixto supera el mínimo necesario con 11 °C. Destimamos el análisis de las máximas porque el invernadero no fue ventilado. En relación con la biblio-

Tabla 3. Temperaturas mínimas y máximas del invernadero vacío

	Situación base	T. máx. aire int [°C]	T. mín. aire int [°C]	T. máx. aire ext [°C]	T. mín. aire ext [°C]
Día 1	Temperatura	40.6	3.7	16.6	6.7
Día 2	Temperatura	42.4	5.8	16.5	7.1

Tabla 4. Cálculo de aporte y carga térmica residual del sistema sólido 864 kg

	Sistema sólido 864 kg	Cap. Cal. [kJ/°C]	T. máx. [°C]	T. mín. [°C]	T. Aire int. Min [°C]	Q [MJ]	T. mín. aire ext
Día 1	Calor aportado	794.8	33.2	13.6		15.6	
	Carga térmica residual	794.8		13.6	10.2	2.7	11.8
Día 2	Calor aportado	794.8	33.9	12.5		17.0	
	Carga térmica residual	794.8		12.5	8.2	3.4	9.1

Tabla 5. Cálculo de aporte y carga térmica residual del sistema sólido 1968 kg

	Sistema sólido 1968 kg	Cap. Cal. [kJ/°C]	T. máx. [°C]	T. mín. [°C]	T. Aire int. min [°C]	Q [MJ]	T. mín. aire ext
Día 1	Calor aportado	1810	27	11.4		28.3	
	Carga térmica residual	1810		13.6	6.4	13.0	7.8
Día 2	Calor aportado	1810	31.9	14.3		31.9	
	Carga térmica residual	1810		12.5	9.4	5.6	10.6

Tabla 6. Cálculo de aporte y carga térmica residual del sistema mixto 864 kg

	Sistema mixto 864 kg	Cap. Cal. [kJ/°C]	T. máx. [°C]	T. mín. [°C]	T. Aire int. Min [°C]	Q [MJ]	T. mín. aire ext
Día 1	Calor aportado hormigón	574.1	40.3	16.7		13.6	
	Calor aportado H ₂ O	1004.6	41.0	18.7		22.5	36.1
	Carga térmica residual hormigón	574.1		16.7	13.3	1.9	7.3
	Carga térmica residual H ₂ O	1004.6		18.7	13.3	5.4	13.3
Día 2	Calor aportado hormigón	574.1	36.6	13.9		13.1	35.9
	Calor aportado H ₂ O	1004.6	38.3	15.6		22.8	
	Carga térmica residual hormigón	574.1		13.9	11	1.7	6.3
	Carga térmica residual H ₂ O	1004.6		15.6	11	4.6	8.7

grafía relevada, se observa que con sistema mixto se logran resultados similares a los obtenidos en Túnez en invernáculos con calentadores solares de agua (12 °C en el interior), y de esta manera se reafirma que el agua tiene buen comportamiento en climas templados o intermedios.

EVALUACIÓN TÉRMICA-ECONÓMICA DE DIFERENTES CAPACIDADES DE CARGA DEL SISTEMA

En principio se analiza el comportamiento térmico de los cuatro sistemas ensayados (Figura 5).

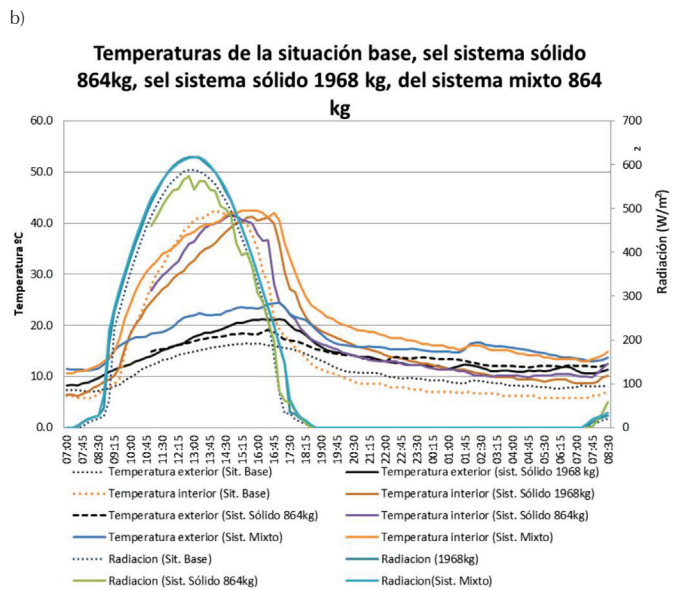
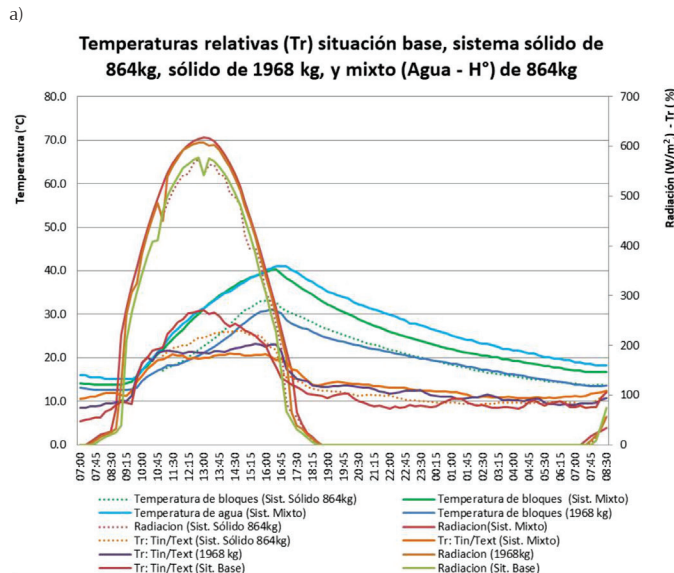


Figura 5. a) Amortiguamiento térmico (Tr) y b) temperaturas registradas para diferentes configuraciones del sistema

En cuanto al amortiguamiento térmico se puede apreciar que el sistema sólido de 1968 kg y el mixto de 864 kg presentan similares comportamientos térmicos, diferenciándose del sistema sólido de 864 kg, que presenta mayor Tr en el pico diurno. Los tres sistemas mejoran el amortiguamiento térmico del invernadero. Sin embargo, el sistema mixto mejora sustancialmente en la fase nocturna o de descarga, superando al sistema sólido de 1968 kg, evitando el fenómeno conocido como inversión térmica. Este fenómeno, presente tanto en la situación base como en el sistema sólido de 864 kg, se encuentra asociado a las características del polietileno utilizado (tipo LD sin filtro para la radiación infrarroja) y a la consiguiente emisión radiativa hacia la atmosfera durante el periodo nocturno.

Para complementar este análisis en la Tabla 7 se observa el cálculo de costos de cada sistema y su relación con el aporte térmico diario máximo que pueden entregar. En los tres casos, la radiación solar tuvo un orden similar (entre 590 y 620 W/ m²).

Tabla 7. Costos de los sistemas ensayados

	Sistema sólido 864 kg	Sistema sólido 1968 kg	Sistema mixto 864 kg
Hormigón [Núm. bloques]	36	82	26
Agua [Núm. tubos]	0	0	6
Tapas [Núm.]			12
Costo bloques [USD]	291	662	210
Costo tubos [USD]	0		74
Costo tapas [USD]	0		32
Costo adhesivo [USD]	0		7
TOTAL [USD]	291	662	322
Aporte térmico [MJ/día]	17	32	36
Costo/aporte [USD/MJ]	17.1	20.7	9.0

El costo del sistema sólido de 864 kg es de 17.1 USD/MJ y el del sólido de 1968 kg se amplía a 20.7 USD/MJ. Sin embargo, el sistema mixto que presenta mayor aporte térmico, demuestra tener un costo significativamente menor que los sólidos, de 9 USD/MJ. Esto le otorga un valor adicional a su evidente mejora térmica. Asimismo este sistema reduce la mano de obra de montaje de los

acumuladores, ya que los bloques se reducen a los mínimos necesarios para sostener los tubos de agua.

En síntesis, este desarrollo permite variar su masa total y configuración para conseguir mejoras tanto térmicas como económicas y así resolver el problema de inversión respecto a las condiciones de tenencia de las tierras.

A los efectos de generalizar los resultados de este estudio, es necesario destacar que los valores térmicos obtenidos resultan de utilidad para caracterizar el sistema de forma cuali-cuantitativa y comparar las prestaciones de las diferentes configuraciones propuestas. Sin embargo, se deberían considerar como limitaciones los aspectos referidos a las características del suelo del invernadero utilizado en este ensayo (baldosas de concreto), la ausencia de cultivos en el interior del invernadero, y el tipo de edificación en los alrededores de su localización (construcciones alrededor a una distancia de 20 m), las cuales generan condiciones diferentes a las de un invernadero real.

CONCLUSIONES

El trabajo permitió avanzar en el conocimiento de un sistema solar pasivo previamente desarrollado, aplicado a la climatización y estabilización térmica de los espacios productivos.

La metodología desarrollada permitió conocer la respuesta térmica del espacio del invernadero frente a diferentes sistemas y tipos de masa de acumulación (sólidas y líquidas) y evaluar los aportes y cargas térmicas residuales, necesarios para considerar su uso en estos espacios y dimensionar instalaciones. Asimismo, se pudo evaluar la eficiencia térmico-económica de distintas configuraciones para determinar la más factible.

En cuanto a los aportes del trabajo, se logró avanzar en la caracterización de los sistemas y componentes tanto sólidos como líquidos, estableciendo sus ventajas y desventajas. Los ensayos permitieron desarrollar un análisis comparado entre diferentes variantes: (i) invernadero sin masa de acumulación de calor; (ii) incorporación de un sistema con masa de acumulación sólida (hormigón) de 864 kg y 1968 kg; y (iii) un sistema mixto (hormigón y agua encapsulada) de 864 kg.

Los sistemas propuestos demostraron buena eficacia para el amortiguamiento térmico de este tipo de espacios productivos, siendo similares las prestaciones térmicas entre el sistema sólido de 1968 kg y el sistema mixto de 864 kg. Sin embargo, el sistema mixto demostró mejor comportamiento nocturno respecto a los sólidos, ya que presenta mayor sostenimiento de la temperatura.

Los aportes térmicos máximos de los sistemas se cuantificaron en 17 MJ, 32 MJ y 36 MJ correspondiendo a los sólidos de 864 kg, de 1968 kg y mixto de 864 kg, respectivamente. Se logra aproximadamente duplicar el aporte térmico, ya sea por aumento de masa sólida como por reemplazo de igual masa sólida por mixta. Asimismo, los costos de los sistemas se cuantificaron en 17.1 USD/MJ; 20.7 USD/MJ y 9 USD/MJ para el sistema sólido de 864 kg, de 1968 kg y mixto de 864 kg, respectivamente, demostrando una reducción económica sustantiva en el sistema mixto respecto a los demás.

En cuanto a la generalización de este sistema, se advierte la importancia mundial de la problemática en relación con los antecedentes revelados, siendo la climatización de los espacios agro-productivos un punto común a resolver en la mayoría de las localizaciones con climas templados, semi-templados y fríos. A nivel mundial, los invernaderos superan las 450000 ha, están en continuo crecimiento, y se distribuyen mayoritariamente en el área asiática (66 % en China, Japón, Corea) y en la cuenca del mediterráneo (30 %). El sistema presentado podría replicarse en estas regiones donde los climas sean templados como por ejemplo en la región de Almería, España (latitud 36.8°) o la de Shenxian, en China (latitud 36 °), con situaciones similares a las de La Plata, Argentina (latitud 35 °C). Para tales casos, se deberá considerar no solo el aspecto climático sino también las diferencias en los materiales de cubierta de los invernaderos como aspectos específicos para la generalización de los resultados. El polietileno LD del invernadero ensayado (larga duración) es uno de los materiales más utilizados en invernaderos de gran porte, junto con el polietileno LTD (larga duración con protección nocturna), seguido por el uso de chapas plásticas y de vidrio en menor medida. Todos ellos, si bien poseen un mayor costo económico, generan ventajas en el comportamiento térmico del espacio que son favorables para la incorporación del sistema, disminuyendo las pérdidas nocturnas e incrementando su eficiencia. Por otra parte, dado que se trata de un sistema pasivo y versátil, puede considerarse su aplicación aún en climas rigurosos, aportando en estos casos un efecto de base, que es posible complementar con otros sistemas durante las horas de mayor requerimiento térmico.

Actualmente el sistema se encuentra instalado en un invernadero de plantas nativas de la Facultad de Ciencias Naturales y Museo de la Universidad Nacional de La Plata, Buenos Aires, Argentina, en forma de mesas de trabajo (ver Figura 1). Se espera que el sistema amortigüe los picos máximos diurnos y los descensos de temperatura nocturnos para el estudio de plantas específicas. Como estudios futuros para este sistema se

plantean ensayos del comportamiento en un invernadero con otro tipo de cerramiento (chapa ondulada transparente), con un tipo de cultivo específico en su interior y suelo de tierra. Se analizarán las condiciones térmicas en la estación cálida y en la fría, y podrá evaluarse la respuesta de los cultivos ante la presencia del sistema.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se desarrolló con el financiamiento de los dos siguientes proyectos: 1. "Desarrollo de tecnologías y pautas de reciclado masivo de la envolvente edilicia residencial orientado al uso racional y eficiente de la energía en áreas urbanas" (Proyecto de Investigación Plurianual 097, financiado por CONICET, Argentina, 2014/2016. Director Carlos Alberto Discoli) y 2. "Producción social del hábitat sustentable", (Proyecto de Investigación Aplicada financiado por la Universidad Nacional de La Plata, Argentina, 2015-2018. Director Gustavo Alberto San Juan). Estos desarrollos tecnológicos se encuentran en proceso de patentamiento en la oficina de vinculación tecnológica del CONICET, Número de Solicitud Prioritaria: M20150102983.

NOMENCLATURA

T	Temperatura (°C)
T _r	Temperatura relativa (%)
T _{int}	Temperatura del aire interior del recinto (°C)
T _{ext}	Temperatura ambiente exterior (°C)
C _p	Capacidad calorífica (kJ/°C)
T _{max}	Temperatura máxima de los bloques y del agua para un ciclo diario (°C).
T _{min}	Temperatura mínima de los bloques y del agua para un ciclo diario (°C).
C _{·En·}	Costo Energético (USD/MJ)
C _{·aportado}	Calor Aportado (MJ)
R	Radiación solar (W/ m ²)

REFERENCIAS

- Alanis, Saravia, & Lesino. (1978). Material de alto calor específico para muro Trombe-Michel. Actas de 4ta. Reunión de trabajo de ASADES (241-248). La Plata: ASADES.
- Attar, I. & Farhat, A. (2015). Efficiency evaluation of a solar water heating system applied to the greenhouse climate. *Solar Energy*, 212-224. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.06.040>
- Attar, I., Naili, N., Khalifa, N., Hazami, M. & Farhat, A. (2013). Parametric and numerical study of a solar system for heating a greenhouse equipped with a buried exchanger. *Energy Con-*

- version and Management*, 163-173. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.02.017>
- Bairi, A., Martín-Garín, A., Adeyeye, K., She, K. & Millán-García, J. (2020). Enhancement of natural convection for improvement of Trombe wall performance. An experimental study. *Energy and Buildings*, 211, 109788.
- Balcomb, D. & Hedstrom, J. (1980). Determining heat fluxes from temperature measurements in massive walls. The 5th National Passive Solar Conference. Amherst.
- Bellos, E., Tzivanidis, C., Zisopoulou, E., Mitsopoulos, G. & Antonopoulos, K. (2016). An innovative Trombe wall as a passive heating system for a building in Athens A comparison with the conventional Trombe wall and the insulated wall. *Energy and Buildings*, 133, 754-769. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.035>
- Bouadila, S., Kooli, S., Skouri, S., Lazaar, M. & Farhat, A. (2014b). Improvement of the greenhouse climate using a solar air heater with latent storage energy. *Energy*, 663-672. <https://www.researchgate.net/deref/http%3A%2F%2Fdx.doi.org%2F10.1016%2Fj.energy.2013.10.066>
- Bouadila, S., Lazaar, M., Skouri, S., Kooli, S. & Farhat, A. (2014a). Assessment of the greenhouse climate with a new packed-bed solar air heater at night, in Tunisia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31-41. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.051>
- Bourdeau, L., Jaffrin, A. & Moïsam, A. (1980). Capitage et stockage d'énergie solaire dans l'habitat par le moyen de mur diode à chaleur latente. *Revue de Physique Appliquée*, 15(3), 559-568.
- Condorí, M., Durán, G., Vargas, D. & Echazú, R. (2009). Secador solar híbrido. Primeros ensayos. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 2, 35-2.42.
- Divecchia, P. R. & Ruggi, D. (1979). Low and médium temperature heat storage for solar application. *Energia solare e nuove prospettive* (p. 473). Milano: Conferenza Internazionale de Milano.
- Esteves, A. & Gelardi, D. (1999). Muro de botellas de PET para incrementar la inercia termica en invernaderos para cultivos. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 9, 3.
- Esteves, A., Gelardi, D. & Oliva, A. (1997). Muro de botellas de PET para incrementar la inercia térmica en invernaderos para cultivos. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 9, 3.
- Ferrato, J. & Pannelo, M. (2003). Climatización de invernaderos. *Revista IDIA*, XXI, 3(4), 160-163.
- Guerrero-Discoli, R. R. & Ferreyro. (1984). Prototipo experimental de La Plata: Primera campaña de ensayos de habitabilidad y comportamiento energético. Actas de 9a. Reunión de trabajo de ASADES (113-120). San Juan: ASADES.
- IRAM. (1996). Clasificación bioambiental de la República Argentina. Norma IRAM Norm Núm. 11603. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.
- Jodra, J. I., Viegas, G. M., San Juan, G. A. & Discoli, C. A. (2017). Sistema acumulador/amortiguador térmico solar pasivo para el acondicionamiento de espacios agro-productivos. Acta de la X Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente (pp. 02.01-02.12). Salta: UNSa.
- Jodra, J. I., Viegas, G. M., San Juan, G. A. & Discoli, C. A. (2018). Tecnologías modulares de climatización solar pasiva para el hábitat residencial y el de la producción. *Arquitecto*, 102-112.
- Jovanovic, J., Sun, X., Stevovic, S. & Chen, J. (2017). Energy-efficiency gain by combination of PV modules and Trombe wall in the low-energy building design. *Energy and Buildings*, 152, 568-576. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.073>
- Juanicó, L., Piacentini, R. & La Mattina, G. (2011). Desarrollo de invernaderos con sistema sustentable de confort térmico. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 3, 01-3.08.
- Kaushik, S. & Kaul, S. (1989). Thermal comfort in buildings through a mixed water-mass thermal storage wall. *Building and Environment*, 24, 199-207. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(89\)90033-4](https://doi.org/10.1016/0360-1323(89)90033-4)
- Kooli, S., Bouadila, S., Lazaar, M. & Farhat, A. (2015). The effect of nocturnal shutter on insulated greenhouse using a solar. *Solar Energy*, 217-228. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.02.041>
- Lazaar, M., Bouadila, S., Kooli, S. & Farhat, A. (2015). Comparative study of conventional and solar heating systems under tunnel Tunisian greenhouses: Thermal performance and economic analysis. *Solar Energy*, 620-635.
- Lesino, Ovejero & Saravia. (1978). Anteproyecto y análisis térmico de una vivienda con uso de energía solar para la Puna. 4ta. Reunión de trabajo de Energía solar, ASADES (269-305). La Plata: ASADES.
- Li-Hong, G., Mei, Q., Hua-Zhong, R., Xiao-Lei, S., Qing-Yun, C. & Zhen-Xian, Z. (2010). Structure, Function, Application, and Ecological Benefit of a Single-slope, Energy-efficient Solar Greenhouse in China. *Hort Technology*, June 2010 (20-3) 626-631.
- Morse, E. S. (1881). Warming and ventilating apartemets by the sun's rays. Unate States Patent Office. Specification forming part of Letters Patent N°246.626. Salem, Massachusetts.
- Ringuelet, R. & Garat, J. (2000). Los cambios de los sectores productivos tradicionales en la agricultura platense y sus formas asociativas. En Ringuelet R. *Espacio tecnológico, población y reproducción social en el sector hortícola de La Plata* (67-90). La Plata: Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación, UNLP.
- Simonatto, S. (2000). Cambio tecnológico en el Sector Hortícola de La Plata. Período 1985-1995. En R. R. (coord.). *Espacio tecnológico, población y reproducción social en el sector hortícola de La Plata* (23-30). La Plata: Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación.
- Suárez, H. (2012). Invernadero con acondicionamiento térmico solar. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 08, 167-08.172.
- Trombe, F. & Michel, J. (1971). Patente N° PATENT N° 71 23778 Perfectionnements apportés aux habitations équipées d'installations de climatisation naturelle. Francia.
- Urriol, G. (1980). Sistema de ensayo comparativo de muros colectores-acumuladores y simulación de un muro Homogéneo. Actas de 6a. Reunión de trabajo de ASADES (247-272). Catamarca: ASADES.

- Viegas, G. M., Jodra, J. I., San Juan, G. A. & Díscoli, C. A. (2018). Heat storage wall made of concrete and encapsulated water applied to mass construction social housing in temperate climates. *Energy and Buildings*, 159, 346-356. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.001>
- Waisman, M. A. (2011). Superando dualismos: trayectorias socio-productivas en el abordaje de las. *Mundo Agrario*, 12(23).
- Wang, W., Tian, Z. & Ding, Y. (2013). Investigation on the influencing factors of energy consumption and thermal comfort for a passive solar house with water thermal storage wall. *Energy and Buildings*, 64, 218-223. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.05.007>
- Zalewski, L., Joulin, A., Lassue, S., Dutil, Y. & Rousse, D. (2012). Experimental study of small-scale solar wall integrating phase change material. *Solar Energy*, 208-219. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.09.026>
- Zhou, L., Huo, J., Zhou, T. & Jin, S. (2020). Investigation on the thermal performance of a composite Trombe wall under steady state condition. *Energy & Buildings*, 214, 1-10.