

Tejas de caucho y plástico reciclado: análisis de sus propiedades optotérmicas

Recycled rubber and plastic roof tiles: analysis of their optothermal properties

Recibido: mayo 27 / 2020 • Evaluado: septiembre 16 / 2020 • Aceptado: mayo 16 / 2023

María Paz Sánchez-Amono^{*}
CEVE (Centro Experimental de la Vivienda Económica), Córdoba (Argentina)

Halimi Sulaiman^{**}
CEVE (Centro Experimental de la Vivienda Económica), Córdoba (Argentina)

Rosana Gaggino^{***}
CEVE (Centro Experimental de la Vivienda Económica), Córdoba (Argentina)

RESUMEN

Las condiciones de confort interior de los edificios dependen de numerosas variables como la orientación, las ventilaciones y las características de los materiales utilizados. La acumulación o pérdida de calor por dichas características tiene un impacto significativo en el consumo energético de los edificios. La radiación solar de onda corta incidente es absorbida por las superficies construidas y remitida a la atmósfera bajo forma de onda larga, calor sensible. En este artículo se presentan las propiedades opto-térmicas, como lo son el albedo, la emisividad térmica, la temperatura superficial y el índice de reflectancia solar, de tejas elaboradas con caucho proveniente de los neumáticos fuera de uso, y de polietileno de baja densidad reutilizado de bolsas, bidones y caños desechados. Se discuten los resultados mediante la definición de las ventajas y desventajas, así como algunos lineamientos para futuras investigaciones.

Palabras Clave:

reciclaje; residuos; tejado; propiedades opto-térmicas

ABSTRACT

The indoor comfort conditions of buildings depend on numerous variables such as orientation, ventilation, and the characteristics of the materials used. The accumulation or loss of heat due to these characteristics has a significant impact on the energy consumption of buildings. Incident shortwave solar radiation is absorbed by the building surfaces and reflected back to the atmosphere in the form of longwave sensible heat. This paper presents the opto-thermal properties, such as albedo, thermal emissivity, surface temperature, and solar reflectance index, of roof tiles made of rubber from scrap tires and low-density polyethylene recycled from discarded bags, drums, and pipes. The results are discussed by defining the advantages and disadvantages as well as some guidelines for future research.

Keywords:

recycling-waste-tiles; roofing; opto-thermal properties; opto-thermal properties

CÓMO CITAR

Sánchez-Amono, M. P., Sulaiman, H., y Gaggino, R. (2024). Tejas de caucho y plástico reciclado: análisis de sus propiedades optotérmicas. *Revista de Arquitectura (Bogotá)*, 26(1) pp. 49-64 <https://doi.org/10.14718/RevArq.2024.26.3378>

- Arquitecta de la Universidad Católica de Córdoba, Argentina, 2009
Doctora en Ingeniería de la Universidad Tecnológica Nacional, Córdoba Argentina (UTN), 2018
◆ https://scholar.google.com/citations?view_op=list_works&hl=es&user=ka8IHtAAAAAJ
ID <https://orcid.org/0000-0002-7333-0938>
✉ arq.mpsa@gmail.com
- Arquitecta Universidad Nacional de San Juan, 2004
Doctora en Arquitectura de la Universidad de Mendoza, Argentina, 2011
◆ <https://scholar.google.com/citations?user=AYxohPkAAAAJ&hl=es>
ID <https://orcid.org/0000-0002-8410-6181>
✉ drahsulaiman@gmail.com
- Arquitecta de la Universidad Nacional de Córdoba, 1990
Doctora en Ciencias del Diseño Universidad Nacional de Córdoba (UNC), CEVE (Centro Experimental de la Vivienda Económica), Córdoba (Argentina, 2009)
◆ <https://scholar.google.com/citations?hl=es&user=s-S3YXCAAAAJ>
ID <https://orcid.org/0000-0002-4724-1165>
✉ rosanagaggino@gmail.com

INTRODUCCIÓN

En Argentina se producen más de 45 000 toneladas diarias de residuos. De estos, 40% corresponden a la provincia de Buenos Aires (18 000 toneladas), la cual es seguida por la ciudad de Buenos Aires (7 000), Córdoba (4 500) y Santa Fe (4 300) (Martínez, 2022). De los materiales de estos residuos, algunos pueden reabsorberse (como es el caso de los restos de alimentos, que pueden aprovecharse como abono para cultivos); otros, por su escasa o nula biodegradabilidad, como es el caso de los plásticos y el caucho, se acumulan, entierran o incineran en basurales (legales o ilegales), lo que produce contaminación y desaprovecha irracionalmente los recursos. La generación de grandes volúmenes de residuos sólidos urbanos (RSU) representa un problema crítico en todo el país, pues existen requisitos para su manejo e implican riesgos sanitarios e impactos ambientales y sociales importantes que recrudescen el modelo económico lineal —no circular— de los residuos. Todo lo anterior ocurre en un contexto caracterizado por las limitaciones presupuestarias, logísticas, territoriales, institucionales y de participación comunitaria que sufren los municipios al momento de buscar gestión inclusiva y sustentable (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022).

Desde las últimas décadas ha existido una fuerte preocupación ambiental debido a las consecuencias que ocasiona el destino final de los residuos. Nos encontramos, entonces, ante un problema de escasez de recursos y exceso de residuos. Por esta razón, las innovaciones tecnológicas y sociales desempeñan un papel primordial en el logro de la construcción de un hábitat sostenible y en la búsqueda de alternativas utilizando materias primas renovables. La disminución de la producción de residuos, el reciclado de los materiales reutilizables y la correcta disposición final de los residuos que realmente no pueden aplicarse para un nuevo uso se visualizan como las mejores soluciones posibles para descontaminar el medioambiente. El reciclado es, además, la mejor forma de evitar la extracción de materias primas. Al investigar características físicas y mecánicas, así como gran disponibilidad, se identificaron dos tipos de residuos: el caucho, proveniente de los neumáticos fuera de uso (NFU) y el polietileno de baja densidad (PEBD).

Un NFU es aquel que, por su estado con respecto de las normas de seguridad vigentes, no es apto para usarse, siempre que no se empleen técnicas que prolonguen su vida útil. En esta categoría también se incluyen los neumáticos rechazados durante el proceso de fabricación y todos aquellos desechados por los usuarios. La disposición final de los NFU es un problema mundial y, en Argentina, no es la excepción: aún no existe una política de estado

para su tratamiento integral. Según datos de la Red de Investigación y Acción sobre Residuos (RIAR), en Argentina se desechan cada año entre 130 000 y 150 000 toneladas de NFU (Sánchez-Granel, 2022).

Los plásticos suponen uno de los componentes principales de la fracción seca de los RSU y son técnicamente valorizables o reciclables a través de sistemas de separación y re inserción en el circuito productivo, en un esquema de economía circular. Según datos suministrados por la Cámara de la Industria de Reciclados Plásticos (CAIRPLAS) en 2021, en el país se reciclaron aproximadamente 286 000 toneladas de plásticos, lo que supone un aumento de casi 11% respecto del año 2020. No obstante, se ha estimado previamente que la capacidad instalada recicladora de plástico presenta 60% de capacidad ociosa (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022). Esto sucede porque los emprendimientos de reciclado, cuya actividad consiste en acopiar los materiales, seleccionarlos, triturarlos, enfardarlos y venderlos, no tienen una provisión permanente de residuos, sino que su cantidad fluctúa y, por tanto, la maquinaria (cinta transportadora, molinos, enfardadora, camión) permanece en desuso durante algunas temporadas. Dicha fluctuación obedece a la eficacia de las campañas de concientización de la población, que es la encargada de una recolección diferenciada de estos en sus domicilios y en lugares públicos, y del precio de los materiales vírgenes, que determina la conveniencia de hacer el reciclado de los residuos.

El PEBD, por su parte, es uno de los materiales plásticos que más ampliamente se usa. Se produce a partir de combustibles fósiles y, a la intemperie, tarda más de 150 años en degradarse. La principal razón de que ocupe esta primera posición es que su costo es bajo y tiene múltiples propiedades de importancia industrial.

Debe tenerse en cuenta que Argentina es uno de los países con mayor consumo de plástico por habitante en Latinoamérica (42.00 kg por habitante), según datos del 2019 de la Cámara Argentina de la Industria Plástica. Para abastecer esta demanda, se producen más de 1162 000 ton al año y se importan otras 882 600 ton, lo que significa un mercado de alrededor de 1 591 000 ton de plástico consumidas en el año (Sbarbati-Nudelman, 2020).

El Centro Experimental de la Vivienda Económica (CEVE) en conjunto con el Centro de Investigación, Desarrollo y Transferencia de Materiales y Calidad (CINTEMAC-UTN-FRC) han abordado esta problemática por medio de desarrollar tejas basadas en residuos reciclados: caucho procedente de los NFU y PEBD procedente de caños, bidones o bolsas reciclados. Uno de los propósitos principales de este proyecto

fue desarrollar una tecnología constructiva que reciclara residuos de plásticos y de caucho para lograr un producto sustentable de triple impacto: ambiental, económico y social. Su impacto es ambiental porque reduce la contaminación al convertir desechos en materias primas; es económico porque incorpora la visión de la economía circular, concepto que concibe que los bienes se producen, se consumen, se reciclan en ese orden de manera cíclica, y, por último, tiene un impacto social positivo ya que, entre otras ventajas, es una tecnología simple que pueda replicarse masivamente en diferentes puntos del país, generar obra y activar la construcción con productos locales de alta resistencia y mínimo desperdicio.

La presente investigación tiene como objetivo principal analizar el comportamiento optotérmico de componentes para construcción (teja) elaborados con un nuevo material elaborado a partir de caucho y PEBD reciclados (Sánchez-Amono, 2018). En el año 2019 se solicitó al Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE) la formación de un servicio tecnológico de alto nivel (STAN) denominado *Evaluación opto-térmica de tejas recicladas: albedo, emisividad térmica, e Índice de reflectancia solar* (Alchapar et al., 2019). En este trabajo se discuten los resultados obtenidos en el informe técnico emitido por el INAHE y se obtienen conclusiones, ventajas y desventajas del elemento constructivo y lineamientos para futuras investigaciones. Esto determinará alternativas para mejorar su desempeño térmico.

Cada material que compone la envolvente edilicia y urbana tiene diferentes propiedades físicas que determinan su capacidad de transferir el calor. Las propiedades superficiales u ópticas son la reflectancia solar o albedo ($\hat{\alpha}$), la absorptancia (α) y la emitancia (ϵ). Cada una de ellas influye en mayor o menor grado en la transferencia de calor por convección, radiación y conducción sol-aire. El albedo es el porcentaje de energía solar reflejada por una superficie. Esta propiedad es determinante para la temperatura máxima en un material (Levinson et al., 2002). La absorptancia es el cociente entre el flujo de calor radiante absorbido por una superficie y el flujo de calor radiante incidente. La emitancia térmica es el cociente entre la exitancia total de una superficie considerada y la exitancia total del cuerpo negro a la misma temperatura (Instituto Argentino de Normalización [IRAM], 2002). En el apartado "Metodología de la medición" se desarrollan en detalle todas las variables medidas.

El Índice de Reflectancia Solar se define como del resultado de la sustracción de la temperatura patrón negra, menos la temperatura del material testeado, dividido el valor dado por la resta de la temperatura del patrón

negro menos la temperatura del patrón blanco (Madlener, 2011). Techos, fachadas de edificios, calles, plazas, etc. representan una importante masa de acumulación, ya que absorben la radiación solar y la reemiten al ambiente en forma de radiación de onda larga y con un desfase en el tiempo.

La alta capacidad térmica y la absorción de los materiales sumadas a la extensión de las superficies expuestas, sobre todo por las superficies horizontales, son significativas en el aumento de temperatura en las ciudades. La emisión de la energía almacenada se produce con un desfase temporal debido a la inercia térmica de los materiales. Esto se traduce en un aumento de las temperaturas, sobre todo en las horas más frías, lo que reduce la amplitud térmica y dificulta el enfriamiento nocturno (Davies et al., 2008). Debido a que los materiales que componen las envolventes urbanas son responsables de la interacción entre el edificio y el medioambiente, afectan tanto el consumo de energía para el acondicionamiento térmico de los edificios como las temperaturas de la ciudad.

En cuanto a los antecedentes de estudios similares sobre este tipo de componentes u otros en relación a las características y metodologías de evaluación optotérmica, se puede mencionar el trabajo titulado "Sustentabilidad energética urbano-edilicia. Características termo-físicas de tecnologías de techo tradicionales y recicladas" (Alchapar et al., 2020). El objetivo general de este trabajo fue categorizar los distintos materiales de cubiertas de techo de acuerdo con su capacidad para disminuir las temperaturas urbanas mediante el cálculo del SRI de acuerdo con la norma ASTM E1980-11 (American Society for Testing and Materials [ASTM] International, 2019). Se clasificaron 31 tipos de materiales de techos de tecnología tradicional de mayor frecuencia de uso en el mercado nacional, en contraste con el comportamiento de una teja con tecnología reciclada compuesta por residuos de caucho. Los materiales de techo fueron clasificados según características morfomateriales, de composición, cromáticas, morfológicas, de terminación, etc.

Estudio optotérmico de la teja reciclada

Se describen los valores de reflectancia solar o albedo, emisividad térmica, temperatura superficial (TS), e SRI de tejas elaboradas con caucho y plástico reciclado desarrolladas en el CEVE del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Las tejas (figura 1) son un componente constructivo elaborado a partir de residuos de NFU y PEBD. Su fabricación se lleva a cabo con una máquina extrusora para plásticos estándar mediante un proceso combinado de extrusión y moldeo por compresión. Por contri-

buir a la descontaminación del ambiente, se puede decir que es un componente sustentable, íntegramente constituido por materiales de desecho reciclados. En este caso no se utilizan materias primas no renovables, como lo hacen la mayoría de las tecnologías tradicionales. En

los aspectos técnicos, las principales ventajas de las tejas desarrolladas en este proyecto son una menor densidad, una menor absorción de agua y una mayor resistencia al impacto duro (granizo) y a la flexión con respecto a las tejas tradicionales de cerámica y hormigón (Sánchez-Amono, 2018).

Figura 1. Teja negra.



Fuente: elaboración propia (2019).

En estudios previos, para obtener el Certificado de Aptitud Técnica (CAT) en Argentina (Gaggino et al., 2019) se calculó la transmitancia térmica y se evaluaron los riesgos de condensación superficial e intersticial con el objetivo de evitar de los puentes térmicos. Además, en los cálculos de riesgo de condensación superficial e intersticial se observó el mismo alcance territorial (cálculo en zona extrema: El Calafate, Provincia de Santa Cruz, 50°20'22"S y 72°15'54"O) con una temperatura de diseño interior de 18°C y una temperatura exterior de

invierno de -15°C. No obstante, se recomienda hacer pruebas con prototipos previos en las zonas de mayor humedad relativa y menor temperatura (por ejemplo, en 15°C, humedad relativa [HR] de 80%, exterior de diseño invierno) (Sulaiman et al., 2020). Para la Zona VI (muy fría), la cual comprende toda la extensión de las altas cumbres de la Cordillera de los Andes y el extremo sur de la Patagonia, Tierra del Fuego, Islas Malvinas y Antártida, este tipo de tejas es ideal, ya que al ser oscuras absorben la radiación y, de esta manera, conservan el calor en su interior.

METODOLOGÍA

Condiciones de las mediciones

La unidad muestral corresponde a 1m² de tejas color negro, montada en un bastidor de madera sobre una superficie horizontal de poliestireno

expandido de 10cm de espesor, dentro de un predio del Centro Regional de Investigaciones Científicas y Técnicas (32°53'45"S y 68°52'28"O) (figura 2).

Figura 2. Unidad muestral de teja reciclada (bastidor 1 m²).



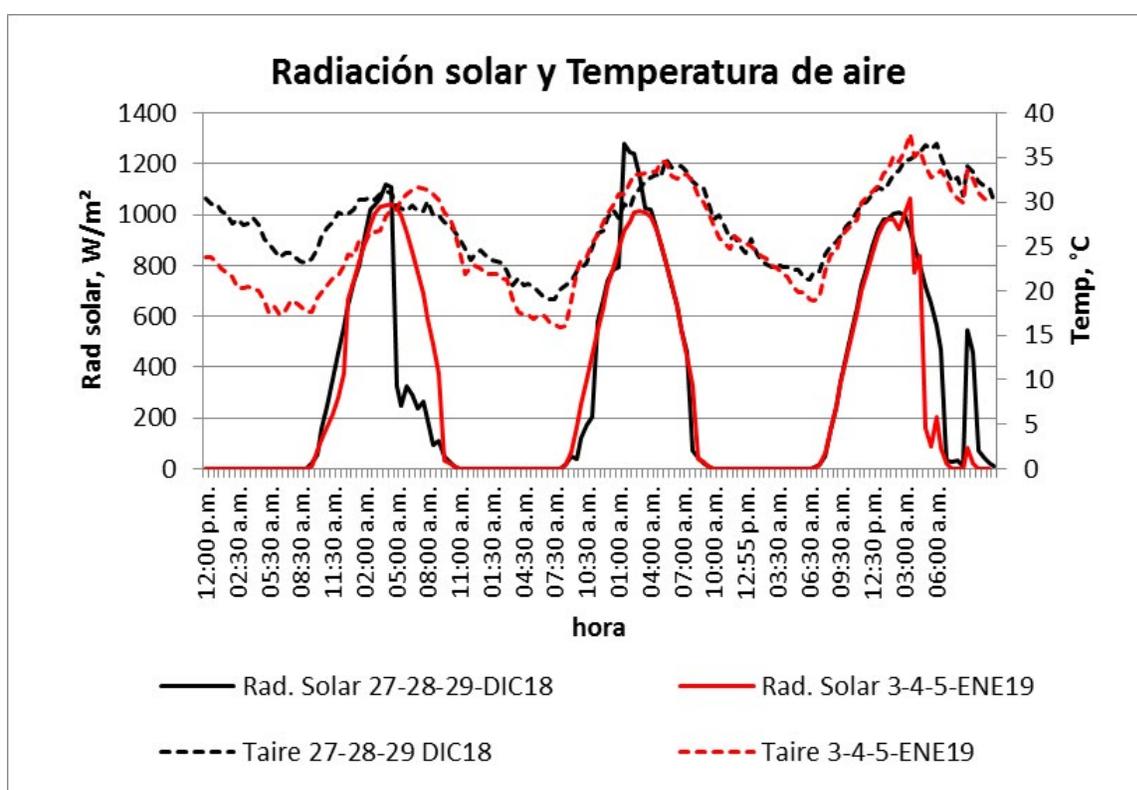
Fuente: elaboración propia (2019).

Las dimensiones (1m × 1m) están establecidas por las normas que se detallan en el apartado “Metodología de medición”. En cuanto a la inclinación, si bien la norma establece el ensayo en el plano horizontal (0°), también se experimentó a 30°, ya que es el más representativo para una cubierta a dos aguas.

Así pues, el monitoreo optotérmico de la unidad muestral se llevó a cabo bajo dos ángulos de inclinación (0° y 30°) por un periodo estival, que comprendió desde el 21 de diciembre de 2018 al 09 de febrero de 2019. Las características ambientales de los días de medición fueron registradas con una estación meteorológica móvil tipo ONSET Weather

HOBO® modelo H21-001, cuyo rango operativo se encuentra entre 253°K y 323°K. La estación poseía un sensor de temperatura y humedad relativa HOBO S-THB-M002 61, un sensor de velocidad del viento HOBO S-WSA-M003, un sensor de dirección del viento HOBO S-WDA-M003, un piranómetro de silicón HOBO S-LIB-M003 y un sensor de presión barométrica HOBO S-BPA-CM10. En la figura 3 se describen las condiciones microclimáticas de los días 27, 28 y 29 de diciembre de 2018, así como del 3, 4 y 5 de enero de 2019, con el fin de registrar condiciones climáticas estables. Cabe señalar que en el primer periodo se probó la unidad muestral con una pendiente de 30° y, en el segundo, con una pendiente de 0°.

Figura 3. Radiación solar, W/m²; temperatura de aire, grados centígrados del periodo evaluado.



Fuente: Alchapar et al. (2019).

Metodología de medición

Los registros optotérmicos se llevaron a cabo según métodos y equipamiento listados en la tabla 1.

Tabla 1. Detalle de métodos y equipamiento para evaluar albedo ($\hat{\alpha}$), emisividad térmica (ϵ) e índice de reflectancia solar (SRI)

Normas y métodos	Método variante de la Norma ASTM E1918-16: <i>Standard Test Method for Measuring Solar Reflectance of Horizontal and Low-Sloped Surfaces in the Field</i> (2021)
	ASTM E1933-14: <i>Standard Practice for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometer</i> (2018)
	ASTM E1980-11: <i>Standard Practice for Calculating Solar Reflectance Index of Horizontal and Low-Sloped Opaque Surfaces</i> (2019)
Instrumentación	Albedómetro (Kipp & Zonen CMA11, rango espectral de 285 μm a 2800 μm)
	Termómetro (tipo IR Fluke 568 con ajuste de emisividad)
	Cámara termográfica infrarroja (tipo Fluke Ti55, rango de 7.5 μm a 14 μm)
	Termocupla T incorporada a <i>dataloggers</i> (LASCAR EL-USB-TC) Colorímetro digital (Color Muse – COLORONE)
Software de análisis	SmartView 2.1
Nota	Los resultados de la prueba corresponden solo a la muestra analizada. Pueden existir variaciones en los resultados entre muestras causadas por materiales no uniformes

Fuente: Alchapar et al. (2019).

Albedo o reflectancia solar global hemisférica ($\hat{\alpha}$)

Se trata del método variante ASTM E1918A (Akbari et al., 2008). El método de ensayo establece el procedimiento para medir la reflectancia solar de un material sobre un área de 1m² mediante el uso de un piranómetro o un albedómetro y un par de máscaras de color blanco y negro. La irradiancia solar (potencia por unidad de área) que incide sobre el sensor de un piranómetro horizontal mirando hacia abajo es un promedio ponderado de la radiación solar y de sus alrededores reflejada por unidad de área del objetivo.

Emisividad térmica para superficies opacas (ϵ) (ASTM E1933-06)

La emisividad infrarroja es una propiedad térmica de la superficie de un material que permite estimar la cantidad de energía térmica que absorbe o emite un cuerpo a cierta temperatura, comparada con la de un cuerpo negro en las mismas condiciones.

Este método de prueba cubre los procedimientos para medir y compensar la emisividad de un material opaco a través del registro de TS de la muestra con un radiómetro de imagen infrarroja tipo IR Fluke 568. El método emplea un sensor de temperatura (termocupla tipo T)

asociado con un *datalogger* (registrador de datos) tipo (LASCAR EL-USB-TC). El valor del flujo radiante emitido por el material es comparado con el dato que registra el termómetro IR con ajuste de emisividad. De tal modo, la emisividad del material corresponde a aquella que hace coincidir la temperatura de la termocupla con la del termómetro IR (ASTM International, 2006).

Temperatura superficial (TS)

Para construir el perfil de TS diaria del material se utilizan termocuplas tipo T incorporadas al *datalogger* tipo LASCAR EL-USB-TC por medio de un censo cada 5 min. Paralelamente, durante el periodo de máxima radiación, se toman registros de TS con una cámara infrarroja tipo IR Fluke Ti55 y se contrastan los resultados para disminuir los posibles errores arrojados durante las mediciones de campo y para verificar aquellos materiales que se pudieran comportar como selectivos. Así, la conductividad térmica se desprecia, ya que se trabaja con el límite adiabático respecto de la conductividad a tierra (superficie de poliestireno expandido de 10 cm de espesor).

Índice de reflectancia solar ASTM 1980-11

El SRI estima la capacidad de una superficie de reflejar la radiación recibida. Se expresa como un porcentaje entre 0% (menor capacidad) y 100%

(mayor capacidad). El SRI se calcula utilizando ecuaciones basadas en datos previamente definidos de reflectancia solar o albedo ($\hat{\alpha}$), emisividad (ϵ) y TS en estado estacionario y en relación

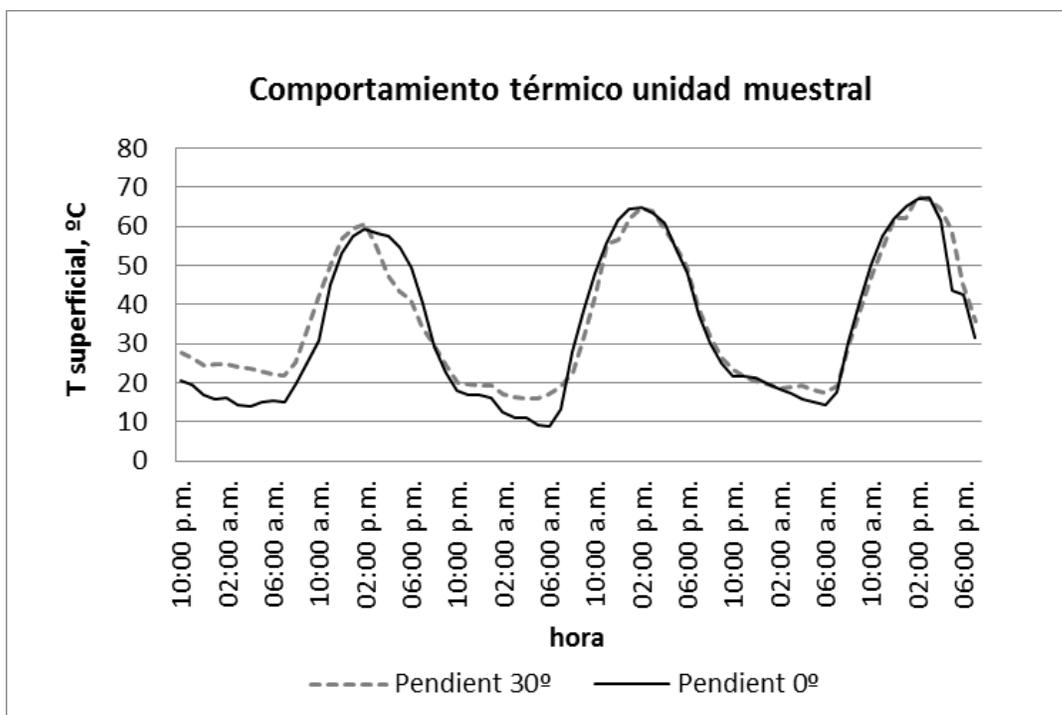
con una superficie de patrón negra y otra blanca. En este informe se ha calculado el SRI bajo dos coeficientes convectivos: bajo ($hc < 5Wm^{-2}K^{-1}$) y medio (hc entre $6Wm^{-2}K^{-1}$ y $12Wm^{-2}K^{-1}$).

RESULTADOS

En la figura 4 se grafican las curvas de TS de la unidad muestral durante el periodo del 27, 28, y 29 de diciembre de 2018 (pendiente de 30°) y el 3, 4 y

5 de enero de 2019 (pendiente de 0°). Los perfiles de temperatura fueron censados con termocuplas asociadas con *dataloggers* (LASCAR EL-USB-TC).

Figura 4. Curvas de temperatura superficial de la unidad muestra bajo dos ángulos de inclinación.



Fuente: Alchapar et al. (2019).

La tabla 2 describe las magnitudes monitoreadas o calculadas: albedo ($\hat{\alpha}$); emisividad térmica (ϵ); TS promedio, así como

TS mínima y máxima promedio de los días monitoreados, y SRI para la unidad muestral de referencia.

Tabla 2. Resultados de propiedades optotérmicas.

Variables	Unidad muestral	
Ensayadas	Pendiente 0°	Pendiente 30°
<i>Propiedades optotérmicas</i>		
$\hat{\alpha}$ (albedo)	0.32	0.34
ϵ (emisividad térmica)	0.86	0.86
<i>Comportamiento térmico diario de los días seleccionados</i>		
Ts prom. °C	34.01	35.97
Ts máx. prom. °C	67.29	67.64
Ts mín. prom. °C	8.64	15.79
Índice		
SRI (%)*	51	49
SRI (%)**	52	49

Variables	Unidad muestral
Sistema de color	
RGB	75, 78, 80
CIE	32.93, 0.60, 1.62

Fuente: Alchapar et al. (2019).

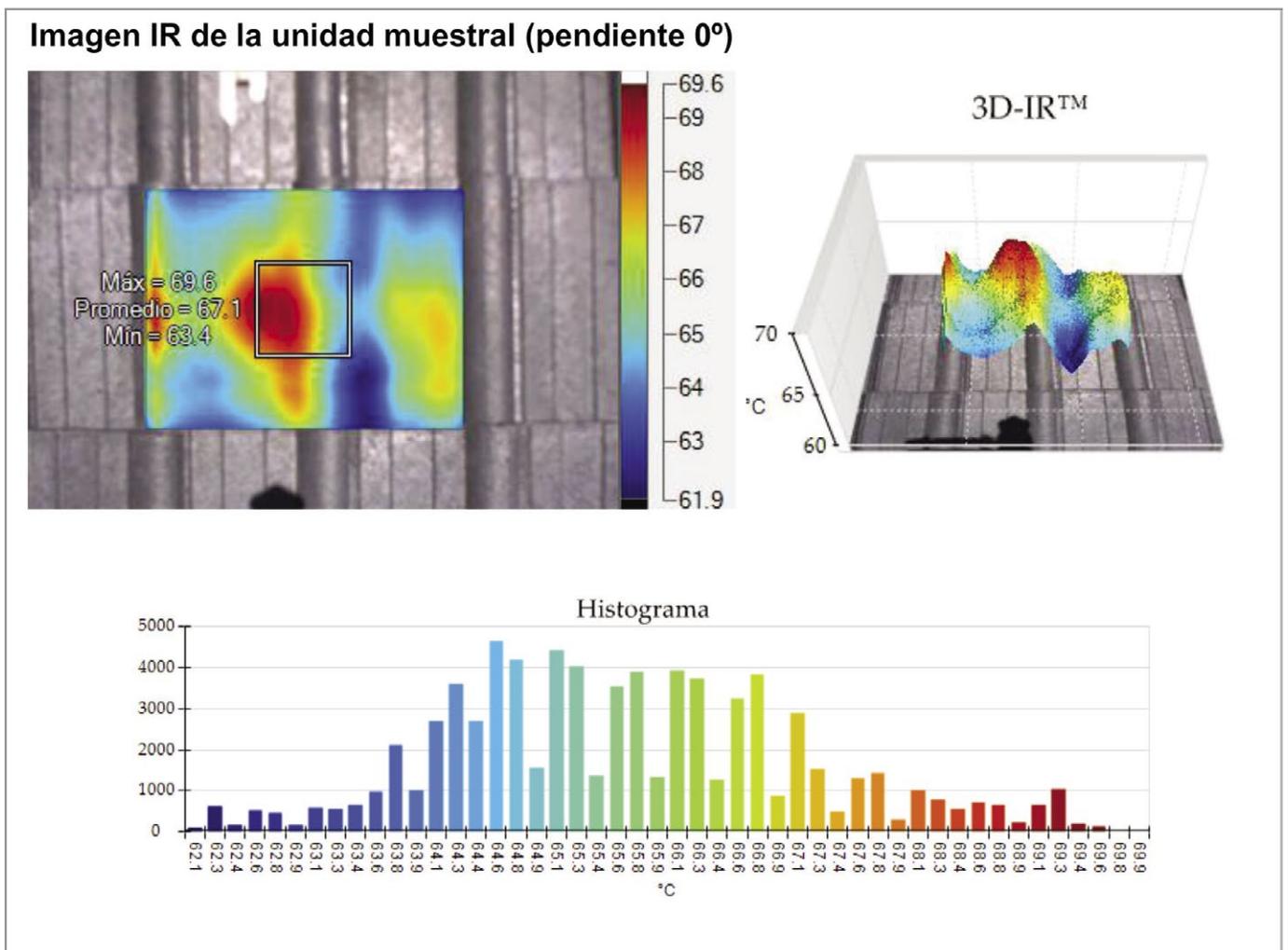
*SRI para coeficiente convectivo bajo ($hc \geq 5 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$)

**SRI para coeficiente convectivo medio ($hc = 6 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$)

Las imágenes infrarrojas (figuras 5 y 6) grafican la temperatura superficial de la unidad muestral durante la ocurrencia de las temperaturas máximas de aire. Estas fueron registradas con una cámara IR (Fluke Ti 55) y, luego, se les analizó con el software

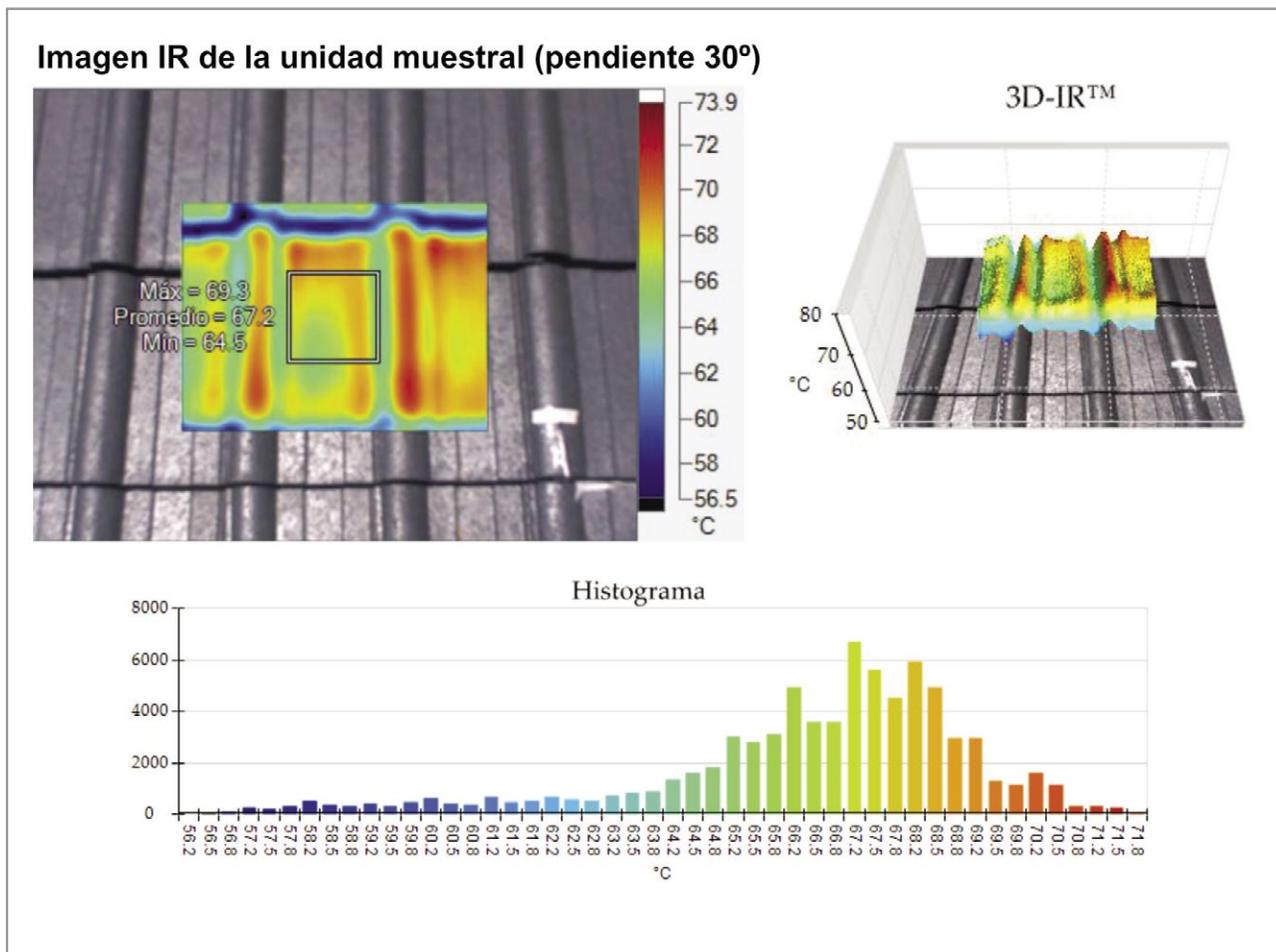
SmartView 2.1. La absorptancia solar (α) es el opuesto complementario del albedo ($\hat{\alpha}$). Por lo tanto, en la pendiente de 0° , si el albedo es de 0.32, la absorptancia será de 0.68. Para el caso de pendiente 30° , el albedo es de 0.34 y la absorptancia de 0.66.

Figura 5. Imagen infrarroja de unidad muestral plana (pendiente 0°) en planta, axonométrica y distribución de frecuencias de temperatura superficial.



Fuente: Alchapar et al. (2019).

Figura 6. Imagen infrarroja de unidad muestral inclinada (pendiente 30°) en planta, axonométrica y distribución de frecuencias de temperatura superficial.



Fuente: Alchapar et al. (2019).

DISCUSIÓN

Curvas de temperatura superficial y tabla de valores definitivos

Se observa en la figura 4 que la pendiente superficial a un ángulo de inclinación de 30° presenta una menor variabilidad en la TS, especialmente en las horas de la madrugada, pues alcanza una diferencia de hasta +10 °C respecto a la pendiente 0°. Este resultado es esperable debido a la combinación del color negro de las tejas con una mayor exposición a la cúpula celeste con pendiente 0°, lo que propicia la pérdida de calor por radiación nocturna.

Con respecto a las curvas de TS de la muestra, de acuerdo con los dos ángulos de inclinación que se presentan en la figura 4, se deduce que, en cuanto a las horas de exposición solar, los valores son bastante coincidentes, en especial en el periodo de 08:00 a 14:00. Se detectó una disminución de la temperatura con la pendiente de 0° en dicho periodo. Podemos afirmar que la cubierta de tejas de caucho a 30° de inclinación presenta un menor ΔT nocturno, lo cual puede ser muy favorable en climas templados fríos a muy fríos. A su vez, con pendiente 30°, la temperatura alcanzada a las

14:00 supera los 60 °C, valor excesivo con un importante potencial para ser utilizado en la incorporación de paneles o colectores solares en la cubierta norte. Esto se puede observar detalladamente en los valores promedios de TS mínimas y promedio de la tabla 2. Por otra parte, si bien en dicha tabla se observa una variación centesimal en el albedo respecto de la inclinación (0.32 para inclinación 0° y 0.34 para inclinación 30°), el valor de este parámetro corresponde a la mitad del valor de absorción de calor que presenta una teja cerámica (0.64).

Curvas de distribución

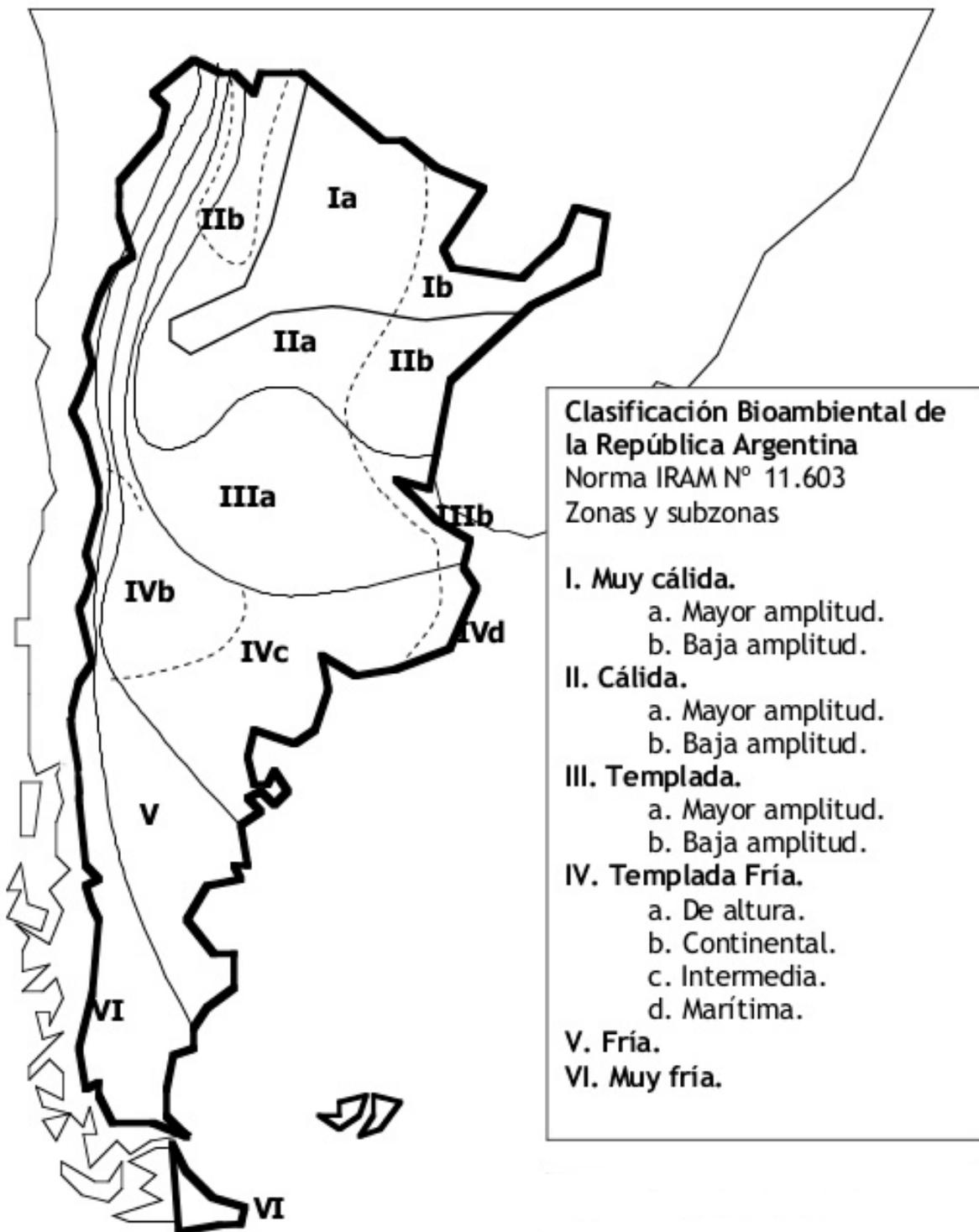
Las figuras 5 y 6 muestran la imagen infrarroja del techo plano e inclinado, respectivamente, y la distribución de frecuencias de TS en cada caso. En las gráficas de la pendiente 0° se observa una distribución relativamente pareja y con un rango acotado de valores de las temperaturas superficiales evidente en el histograma. El rango abarca los valores entre 62.1°C y 69.9°C, y alcanza la mayor densidad de probabilidad de ocurrencia entre 64.1°C y 66.8°C. Al estar el plano paralelo a la cúpula celeste, los valores de la pérdida de energía en la noche son mayores, mientras que con la pendiente

de 30° el rango de distribución de temperaturas superficiales es ampliamente mayor. El histograma registra temperaturas entre 56.2°C y 71.8°C, más dispersas que la pendiente 0°. La desviación estándar fue de 2.38. Ello se debe a la sombra lineal generada por la superposición y pendiente de los elementos constructivos. Esta condición amplía el rango de valores registrados y, por tanto, modifica los valores promedios. La desviación estándar es de 4.13, 57% mayor que en la pendiente 0°. No obstante, es muy importante destacar la concentración de valores de temperaturas entre 66°C y 68.5°C, que significa, comparativamente, una mucha mayor regularidad y, a su vez, valores más

altos respecto de la pendiente 0°. En caso de desestimar los valores generados por la sombra lineal con baja ocurrencia, la desviación estándar es de 1.77.

La inclinación 30° orientada al norte favorece la recepción de una mayor cantidad de rayos solares perpendiculares a la superficie y, por ello, se concentran los valores con mínima dispersión y mayor temperatura. Esta situación es muy favorable en latitudes y alturas sobre el nivel del mar altas, donde los climas varían entre templado frío a muy frío, es decir, según el mapa de las zonas bioclimáticas de Argentina, en aquellas de clasificación de IV a VI (figura 7).

Figura 7. Clasificación bioambiental de la República Argentina.



Fuente: Norma IRAM 11603 (IRAM, 1996a).

También es una ventaja significativa en el caso de considerar la incorporación en la cubierta al norte colectores o paneles fotovoltaicos, ya que el montaje evitaría soportes adicionales gracias a la inclinación. La versatilidad mecánica de esta teja permite anclar elementos metálicos y otros, sin que se rompan ni pierdan sus propiedades hidrófugas

Análisis comparativo de la teja material de reciclado y la teja cerámica

Se realizó una comparación de la teja elaborada a partir de material reciclado (TMR) con respecto a los valores de las propiedades optotérmicas de una teja cerámica color terracota (TC) (Alchapar et al., 2020). Los resultados se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Resultados de comparativa de propiedades optotérmicas

Tipo de teja	Albedo ($\hat{\alpha}$)	Absortancia (α)	Emisividad (ϵ)	TS	SRI
Teja cerámica	0.64	0.36	0.90	47	81
Teja de material reciclado	0.32	0.68	0.86	67	51

Fuente: Alchapar et al. (2019; 2020).

El análisis comparativo de la TMR y la TC determinó que la TMR es de color negro y, por tanto, tiene bajos niveles de albedo, lo que se suma a su relativamente baja emisividad térmica con respecto al color claro (terracota) de la TC.

La TMR presenta un valor 50% menor de albedo, posee 89% más absortancia y muestra 43% más de TS que la TC. Además, la TMR presenta un valor muy similar de emisividad térmica que la TC. Sin embargo, en el SRI la TMR demostró un valor 37% menor que la TC. Por otra parte, la absorción de calor fue más alta en la TMR que en la TC, lo que indica que, en la práctica, aumenta la temperatura del local habitable. La TMC es, pues, apta para ser empleada en climas fríos, ya que durante el día absorben la radiación solar y emiten calor en el interior de la vivienda, mientras que una cubierta con TC implica un mayor gasto en calefacción y también implica instalar un material aislante que impida la fuga de calor hacia el exterior.

Los materiales que registran niveles de SRI cercanos a 100% son los más eficientes. Por esta razón, se propone trabajar en estrategias para elevar los niveles de emisividad de la TMR, ya que la TC tiene un mejor desempeño por su valor superior. Las TMR, por su parte, presentan amplias posibilidades de mejorar su comportamiento optotérmico mediante la incorporación de materiales reflectivos a su composición.

Actualmente se está trabajando en la obtención de tejas coloreadas a partir de la incorporación de pigmentos en la mezcla de caucho y PEBD reciclados. Además, a través de un artículo se realizó una simulación térmico-energética con una placa BENO PET y un

sistema constructivo tradicional de madera que incluía el uso de TMR en la cubierta de techo. Ambas tecnologías son desarrollos del CEVE y están elaboradas con materiales reciclados. Estos sistemas son sustentables, de rápida construcción y bajo costo. Se analizó la teja negra pintada con pintura látex blanco y se evaluó la distribución de las condiciones térmicas interiores, los consumos energéticos de climatización y los costos anuales asociados de aire acondicionado y calefacción. Se obtuvo un ahorro de 43% de energía con respecto al caso base de tejas color negro (Sulaiman et al., 2020).

Cumplimiento de la Norma IRAM 11605

La transmitancia térmica (K) de aire de techos, muros y pisos deberá ser igual o menor a la transmitancia térmica máxima ($K_{m\acute{a}x}$) admisible correspondiente al Nivel B de la norma IRAM 11605 y verificarse para las condiciones de invierno y de verano. Según los cálculos realizados para la ciudad de Córdoba (zona bioambiental IIIa), la tecnología de TMR no presenta condensación superficial y cumple con el nivel C y el nivel B (IRAM, 1996b) en todas las localidades del país que presentan como temperatura de diseño exterior en invierno entre 0°C y -15°C. Asimismo, esta tecnología cumple el nivel C en todas las zonas bioclimáticas del país para verano, y con el Nivel B para todas las zonas, salvo la I y II, por solo dos centésimas (K calculado = 0.47; K admisible en verano nivel B = 0.45). Estos cálculos se estimaron en el trabajo "Análisis del desempeño higrotérmico de un prototipo con tejas de material compuesto" (Sulaiman et al., 2018). Los valores de $K_{m\acute{a}x}$ admisible de techos para condición de invierno y verano se observan en las tablas 4 y 5.

Tabla 4. Valores de $K_{m\acute{a}x}$ admisible de techos para condición de invierno

Invierno	Nivel A	Nivel B	
Temperatura exterior	(W/m ² K)	(W/m ² K)	Nivel B
Mínima de diseño (°C)			(W/m ² K)
-15	0.20	0.52	1.00
-14	0.20	0.53	1.00
-13	0.21	0.55	1.00
-12	0.21	0.56	1.00
-11	0.22	0.58	1.00
-10	0.23	0.60	1.00
-9	0.23	0.61	1.00
-8	0.24	0.63	1.00
-7	0.25	0.65	1.00
-6	0.26	0.67	1.00
-5	0.27	0.69	1.00
-4	0.28	0.72	1.00
-3	0.29	0.74	1.00
-2	0.30	0.77	1.00
-1	0.31	0.80	1.00
≥0	0.32	0.83	1.00

Fuente: IRAM 11605 (IRAM, 1996b)

Tabla 5. Valores de $K_{m\acute{a}x}$ admisible de techos para condición de verano

Zona bioambiental	Nivel A	Nivel B	Nivel C
	(W/m ² K)	(W/m ² K)	(W/m ² K)
II y IV	0.18	0.45	0.72
III y IV	0.19	0.48	0.76

Fuente: IRAM 11605 (IRAM, 1996b)

CONCLUSIONES

El análisis de las propiedades optotérmicas de la cubierta de tejas de NFU y PEBD permite optimizar su uso según las condiciones del lugar de aplicación o transferencia. La revolución en la construcción está ganando impulso y este tipo de teja es un ejemplo. Año tras año surgen nuevos materiales en la industria de la construcción; sin embargo, su difusión y el conocimiento de su existencia son escasos, ya sea por falta de un cambio de mentalidad entre los usuarios o porque todavía no se los incluye en los planes de estudio de carreras como arquitectura e ingeniería. Asimismo, la falta de información de sus propiedades optotérmicas es muy limitada, lo que impide que nuevos profesionales puedan sugerirlos a los futuros usuarios de las viviendas.

Las TMR cuentan con numerosas ventajas con respecto a soluciones de cubierta tradicionales (tejas cerámicas y de hormigón, chapa

de zinc, etc.): son livianas, presentan mayor resistencia al impacto duro (granizo) y a la flexión, poseen baja absorción de agua, entre otras. Por otra parte, al estar fabricadas a partir de materiales de desecho reciclados, evitan la utilización de materias primas no renovables al tiempo que disminuyen la cantidad de residuos que finalizan en un relleno sanitario.

El color es un factor muy importante que condiciona el balance energético entre el planeta tierra y el sol. Debido al calentamiento ocasionado por el efecto isla de calor y su capacidad de absorción térmica, las cubiertas contribuyen a aumentar el consumo energético y, en consecuencia, a incrementar las emisiones de gases de efecto invernadero. Asimismo, una de las variables que las hace más eficientes en la disminución de las temperaturas superficiales de los techos es el albedo. La variación de esta es de 0.02 entre una cubierta de teja en plano

horizontal (0.32) con respecto de una cubierta inclinada a 30° (0.34).

Es importante destacar la aplicabilidad de las TMR en los climas templados, los templados fríos e, incluso, en los muy fríos, dado que al ser de color oscuro (negro) tienen un efecto albedo muy bajo, es decir, poca capacidad de reflexión de la energía solar incidente y, por ello, mucho potencial para absorber el calor. De esta manera, esta absorción térmica se traduce en la emisión de calor al interior de la vivienda. La distinta cantidad de radiación solar que es reflejada o absorbida se debe al color de la superficie. Una mayor absorción de calor ocurre cuando las superficies son oscuras, lo que produce el efecto de calentamiento, y viceversa.

Ahora, el valor de la emisividad térmica es similar en ambas pendientes (0° y 30°). Si se observan las variaciones con respecto al comportamiento térmico, existe un incremento de la TS promedio de casi dos grados (1.96 °C) en la cubierta pendiente de 30°, mientras en los valores de la TS máxima promedio la diferencia es mínima. La cubierta con pendiente de 30° supera en 0.35 °C a la cubierta plana. En cambio, se observa una notoria diferencia en la temperatura superficial mínima promedio en la cubierta pendiente de 30°, con 7.15 °C de más. En conclusión, se aumenta la temperatura del local habitable por transferencia de calor por dirección del flujo de calor vertical descendente. Esta también influye en la aislación térmica adicionada a la cubierta, sobre todo en climas templados y cálidos.

En Argentina, toda la cordillera de los Andes, los valles inter cordilleranos y la Patagonia completa suman una extensión muy significativa de posible aplicación sin ningún tipo de cambio de la cubierta aquí evaluada. Cabe destacar que estas regiones coinciden con zonas de explotación minera y de petróleo donde existe un uso de vehículos OTR (*off-the-road*). Allí se utiliza gran cantidad de neumáticos de gran tamaño que no cuentan con un sistema de tratamiento y que son depositados a la intemperie, lo que ocasiona serios problemas ambientales. En la cubierta de TMR con inclinación de 30° se disminuye la pérdida por radiación

nocturna y aumenta la cantidad de incidencia solar perpendicular sobre la cubierta, como se detalló en la discusión de los resultados.

Futuras líneas de investigación

La mayoría de la población argentina se concentra en las ciudades de clima templado y templado cálido. Las construcciones humanas deben adecuarse bioclimáticamente para conformar un hábitat racional, económico y con el mayor grado de eficiencia energética según el contexto socioeconómico y climático y de acuerdo con los recursos disponibles. En el caso de aplicar las TMR en las zonas cálidas de nuestro país, se proponen diferentes alternativas, como, por ejemplo, incorporar algún tipo de pintura o recubrimiento superficial de color claro para disminuir la absorción de calor por una alta incidencia de la energía solar. Esta solución es una de las más económicas y utilizadas en Argentina. En dichas regiones cálidas, las temperaturas son bastante elevadas y, sin intervención, las TMR provocarían un aumento de consumo de energía en refrigeración.

En cuanto a la terminación de la teja, se experimentó la capacidad de adherencia de pinturas o recubrimientos mediante la incorporación de óxidos y *masterbatch* (Sánchez-Amono et al., 2021). El color es una de las tantas variables que resulta más impactante en el comportamiento térmico superficial de un material. El uso de recubrimientos claros en techos (alta reflectancia solar y emitancia térmica) en edificaciones reduce las cargas de enfriamiento en lugares cálidos y mitiga el efecto de islas de calor en grandes urbes. Para líneas futuras de investigación, se propone la incorporación de pinturas o pigmentos para obtener tejas coloreadas diferentes a las obtenidas durante esta investigación (negro). El color negro que actualmente poseen las tejas es resultado de la acción del negro del carbón que contiene el caucho proveniente de los NFU. Asimismo, se hará un seguimiento anual de la unidad muestral para evaluar el impacto del envejecimiento sobre las propiedades optotérmicas por efecto del desgaste, la suciedad y exposición a la intemperie.

CONTRIBUCIONES Y AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los siguientes organismos financiadores del trabajo: al CONICET, por el financiamiento del Proyecto de Unidad Ejecutora 2017, titulado “Modelo de gestión para la producción regional de componentes constructivos para mejoras habitacionales a partir del reciclado de residuos sólidos urbanos”; al Gobierno de la Provincia de Córdoba, por el financiamiento del Proyecto PIO Residuos Sólidos 2010 titulado “Desarrollo tecnológico de tejas con materiales reciclados para viviendas”.

Los autores de este trabajo han contribuido de la siguiente forma: María Paz Sánchez-Amono en el diseño experimental, la interpretación de los resultados y los análisis de datos; Halimi Sulaiman en la interpretación de los resultados y el análisis de datos, y Rosana Gaggino en la interpretación de los resultados y el análisis de datos. Los autores declaran que no tienen conflictos de interés en relación con la investigación presentada.

REFERENCIAS

- Akbari, H., Levinson, R., & Stern, S. (2008). Procedure for measuring the solar reflectance of flat or curved roofing assemblies. *Solar Energy*, 82(7), 648-655. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.01.001>
- Alchapar, N., Correa, E., & Mercado, H. R. (2019). *Informe técnico de STAN. Servicio Tecnológico de Alto Nivel: Ensayo sobre componente con materiales plásticos reciclados 3270. Determinación de propiedades ópticas e Índices de comportamiento energético de materiales. Evaluación opto-térmica de tejas recicladas: albedo, emisividad térmica e índice de Reflectancia Solar*. Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía [INAHE]; Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas [CONICET].
- Alchapar, N., Sánchez-Amono, M., Correa, E., Gaggino, R., & Positieri, M. (2020). Sustentabilidad energética urbano-edilicia. Características termo-físicas de tecnologías de techo tradicionales y recicladas. *Revista ingeniería de construcción*, 35(1), 73-83. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732020000100073>
- American Society for Testing and Materials [ASTM] International. (2006). *Standard Practice for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers* (ASTM E1933-06).
- ASTM International. (2018). *Standard Practice for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers* (ASTM E1933-14). <https://doi.org/10.1520/E1933-14>
- ASTM International. (2019). *Standard Practice for Calculating Solar Reflectance Index of Horizontal and Low-Sloped Opaque Surfaces* (ASTM E1980-11). <https://doi.org/10.1520/E1980-11R19>
- ASTM International. (2021). *Standard Test Method for Measuring Solar Reflectance of Horizontal and Low-Sloped Surfaces in the Field* (ASTM ASTM E1918-16). <https://doi.org/10.1520/E1918-16>
- Davies, M., Steadman, P., & Oreszczyn, T. (2008). Strategies for the modification of the urban climate and the consequent impact on building energy use. *Energy Policy*, 36(12), 4548-4551. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.013>
- Instituto Argentino de Normalización [IRAM]. (1996a). *Acondicionamiento térmico de edificios* (IRAM 11603).
- IRAM. (1996b). *Acondicionamiento térmico de edificios. Condiciones de habitabilidad en edificios. Valores máximos de transmitancia térmica en cerramientos opacos* (IRAM 11605).
- IRAM. (2002). *Aislamiento térmico de edificios* (IRAM 11549).
- Levinson, R., & Akbari, H. (2002). Effects of composition and exposure on the solar reflectance of portland cement concrete. *Cement and Concrete Research*, 32(11), 1679-1698. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00835-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00835-9)
- Madlener, R., Sunak, Y. (2011). Impacts of urbanization on urban structures and energy demand: What can we learn for urban energy planning and urbanization management. *Sustainable Cities and Society*, 1(1): 45-53, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2010.08.006>.
- Martínez, R. (2022, 18 de octubre). Los residuos urbanos en Argentina y la importancia de una gestión integral para su tratamiento. *Perfil*. <https://www.perfil.com/noticias/opinion/los-residuos-urbanos-en-argentina-y-la-importancia-de-una-gestion-integral-para-su-tratamiento.phtml>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). *Informe del estado del ambiente 2021. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación*. https://ciam.ambiente.gob.ar/images/uploaded/recursos/326/IEA2021_digital.pdf
- Sánchez-Amono, M. P. (2018). *Estudio de la viabilidad de aplicación de polietileno y caucho reciclados para un sistema constructivo de cubierta* [Tesis doctoral]. Universidad Tecnológica Nacional.
- Sánchez-Amono, M. P., Sulaiman, H. C., Alchapar, N. L., Gaggino, R., & Correa Cantaloube, E. N. (2021). Coloración de tejas de caucho y plástico reciclado y su respuesta opto-térmica. *Métodos y Materiales*, 11, 34-42. <https://doi.org/10.15517/mym.v11i0.45809>

- Sánchez-Granel, G. (2022, 20 de septiembre). Cómo se reciclan los neumáticos desechados en materiales para plazas, mobiliario urbano y canchas de césped sintético. *Infobae*. <https://www.infobae.com/america/soluciones/2022/09/21/como-se-reciclan-los-neumaticos-desechados-en-materiales-para-plazas-mobiliario-urbano-y-canchas-de-cesped-sintetico/>
- Sbarbati-Nudelman, N. (Ed.). (2020). *Residuos plásticos en Argentina: Su impacto ambiental y en el desafío de la economía circular*. Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales [ANCEFN]. <https://cairplas.org.ar/2016/wp-content/uploads/2020/12/Residuos-plasticos-final-1.pdf>
- Sulaiman, H. C., Sánchez-Amono, M. P., Gaggino, R., Filippin, C., & Positieri, M. J. (2018). Análisis del desempeño higrotérmico de un prototipo con tejas de material compuesto. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente - AVERMA*, 22, 61-70. <https://portalderevistas.unsa.edu.ar/index.php/averma/article/view/1188>
- Sulaiman, H. C., Sánchez-Amono, M. P., Gaggino, R., & Oga-Martínez, L. M. (2020). Evaluación térmico-energética de un prototipo de vivienda sustentable con materiales reciclados. *Atena*, 2, 75-90. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/145631>