



ISTITUTO NAZIONALE DI RICERCA METROLOGICA Repository Istituzionale

Tecnologías de enfriamiento radiante diurno: el reto de la caracterización de los materiales y de la evaluación de su rendimiento de enfriamiento

This is the author's accepted version of the contribution published as:

Original

Tecnologías de enfriamiento radiante diurno: el reto de la caracterización de los materiales y de la evaluación de su rendimiento de enfriamiento / Pérez, Gloria; Pattelli, Lorenzo; Jaramillo, Jualiana; Campos Acosta, Joaquín; Martín-Consuegra, Fernando; Alonso, Carmen; Frutos, Borja; Guerrero, Ana. - In: E-MEDIDA. - ISSN 2341-1821. - 12:20(2022).

Availability:

This version is available at: 11696/76459 since: 2023-03-14T16:31:36Z

Publisher:

Centro Español de Metrología

Published

DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

TECNOLOGÍAS DE ENFRIAMIENTO RADIANTE DIURNO: EL RETO DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES Y DE LA EVALUACIÓN DE SU RENDIMIENTO DE ENFRIAMIENTO

Gloria Pérez¹, Lorenzo Pattelli², Juliana Jaramillo³, Joaquín Campos⁴, Fernando Martín-Consuegra¹, Carmen Alonso¹, Borja Frutos¹, Ana Guerrero¹

**¹Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETCC-CSIC),
Madrid, España**

²Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRiM), Torino, Italia

³Universidad de Barcelona, Barcelona, España

⁴Instituto de Óptica Daza Valdés (IO-CSIC), Madrid, España.

RESUMEN

El enfriamiento radiante pasivo es la capacidad de los materiales de reducir su temperatura mediante la radiación de energía térmica en el rango infrarrojo del espectro electromagnético, en el que la atmósfera es transparente. Este fenómeno es conocido desde la antigüedad y, en la situación actual de vulnerabilidad de nuestro planeta, representa un mecanismo prometedor para reducir la contribución de edificios e infraestructuras al calentamiento global. Los últimos avances en nanotecnología han permitido obtener materiales que alcanzan temperaturas superficiales por debajo del ambiente, incluso durante el día y bajo irradiación solar. Estos materiales innovadores, de enfriamiento radiante diurno (ERD), se caracterizan por tener una alta emisividad infrarroja, que favorece la radiación de la energía térmica y, al mismo tiempo, una alta reflectancia solar, que evita su sobrecalentamiento. En el presente trabajo se analizan los distintos tipos de materiales ERD desarrollados en los últimos años y algunos de los retos metrologicos que plantea su implementación en aplicaciones reales. En relación con la caracterización fiable de los materiales, es necesario obtener la emisividad hemisférica total del material, en todas las longitudes de onda y en todas direcciones, a partir de la emisividad cuasi-normal que miden los equipos habituales. Además, se deben obtener medidas de campo fiables, para lo cual se deben calibrar los equipos portátiles disponibles a nivel comercial mediante sistemas ERD modelo, con propiedades bien definidas. Entre los retos relacionados con la evaluación del rendimiento de enfriamiento de los sistemas ERD, destaca la necesidad de definir parámetros de caracterización adecuados y de establecer unas condiciones de ensayo homogéneas, para poder comparar el comportamiento de distintos materiales y de cada tipo de material en distintas ubicaciones. Por último, se señalan algunos proyectos en el campo de las tecnologías de ERD, que cuentan con la participación de grupos de investigación españoles.

ABSTRACT

Passive radiative cooling is the ability of materials to reduce their temperature by radiating thermal energy in the infrared range of the electromagnetic spectrum where the atmosphere is transparent. This phenomenon has been known since ancient times and, in the current situation of vulnerability of our planet, it represents a promising mechanism to reduce the contribution of buildings and infrastructures to global warming. The latest advances in nanotechnology have made possible to obtain materials that reach surface temperatures below ambient, even during the day and under solar irradiation. These innovative daytime radiative cooling (DRC) materials are characterized by having a high infrared emissivity, which favors the radiation of thermal energy and, at the same time, a high solar reflectance that prevents overheating. This paper analyzes the different types of DRC materials developed in recent years and some of the metrological challenges to be addressed for their implementation in real applications. In relation to the reliable characterization of materials, it is necessary to obtain the total hemispherical emissivity of the material, at all wavelengths and in all directions, from the near-normal emissivity measured by the usual equipment. In addition, reliable field measurements must be obtained by calibrating commercially available portable equipment using model DRC systems with well-defined properties. The main challenges related to the evaluation of the cooling performance of DRC systems are the need to define adequate figures of merit and the need to establish homogeneous test conditions, in order to be able to compare the behavior of different materials and of each type of material in different locations. Finally, some projects in the field of DRC technologies that have the participation of Spanish research groups are pointed out.

PALABRAS CLAVE

Enfriamiento radiante diurno, reflectancia solar, emisividad, rendimiento de enfriamiento, eficiencia energética, sostenibilidad

KEYWORDS

Daytime radiative cooling, solar reflectance, emissivity, cooling performance, energy efficiency, sustainability

1. INTRODUCCIÓN

Las emisiones de gases de efecto invernadero están dando lugar a un aumento de la temperatura de la Tierra, en la actualidad 1,1 °C más elevada que a finales del siglo XIX, ocasionando múltiples amenazas para la humanidad y el planeta [1]. La actividad humana tiene una clara influencia sobre este fenómeno, tal y como establece el IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático) en el Sexto Informe de Evaluación correspondiente al Grupo I: “Cambio Climático 2021: Bases físicas” (véase figura 1) [2]. Además de provocar consecuencias como sequías intensas, aumento del nivel del mar o disminución de la biodiversidad, el aumento de las temperaturas ha provocado que los sistemas de refrigeración representen actualmente del orden del 20 % del consumo eléctrico y el 10 % de las emisiones gases de efecto invernadero [3]. Se estima que la emisión de CO₂ asociada es de 1 Gt de al año, junto a

un importante coste económico. Por ello, resulta necesario tomar medidas urgentes, para aumentar de manera drástica la eficiencia energética en refrigeración, con el fin de mitigar los efectos del estrés térmico y del cambio climático. Los materiales de enfriamiento radiante diurno (ERD) resultan prometedores como solución integral y rentable a este problema.

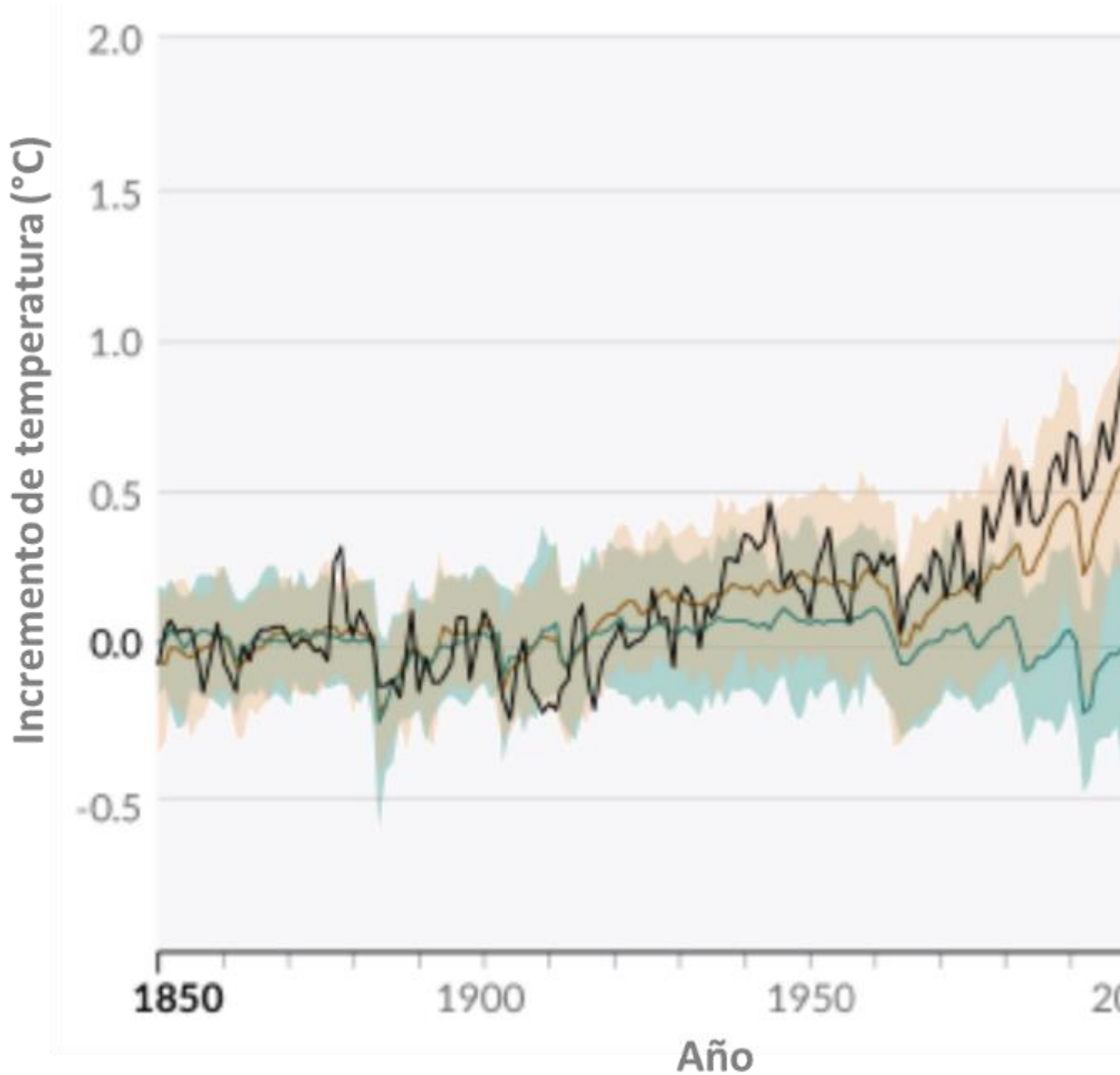


Figura 1 – Cambio en la temperatura superficial global (promedio anual de 1850 a 2020) observado y simulado, considerando factores humanos y naturales, y sólo naturales [2].

El enfriamiento radiante es un proceso pasivo que aprovecha la diferencia de temperatura entre los objetos en la superficie de la Tierra (≈ 300 K) y el espacio exterior (≈ 3 K). Debido a esta diferencia de temperatura, se produce, por radiación térmica, un proceso de intercambio de calor que ocurre principalmente a través de la primera

ventana atmosférica infrarroja (IRAW, por sus siglas en inglés). La IRAW es una banda espectral casi transparente, donde los gases atmosféricos apenas absorben la radiación de onda larga saliente, entre $8\ \mu\text{m}$ y $13\ \mu\text{m}$. La longitud de onda ($9,7\ \mu\text{m}$) donde se produce la emisión máxima de la radiación de cuerpo negro a temperatura ambiente promedio ($\approx 300\ \text{K}$) está dentro de la IRAW, lo que permite el enfriamiento pasivo de un objeto en la superficie de la Tierra a través de este canal radiante de transferencia de calor hacia el espacio exterior.

Este es un fenómeno bien conocido desde la antigüedad, que explica por qué a veces podemos encontrar cristales de hielo sobre la hierba o una fina capa de hielo sobre el parabrisas de un coche, después de una noche de cielo despejado, incluso cuando la temperatura ambiente se mantuvo por encima de cero. La sílice con la que se elabora el parabrisas y la celulosa que conforma la hierba son buenos emisores en el infrarrojo. Durante la noche, cuando el sol está ausente, no hay ganancia de calor por absorción solar y el balance de energía causa un enfriamiento pasivo. Sin embargo, obtener el mismo efecto durante el día representa un gran reto, puesto que el enfriamiento radiante por debajo de la temperatura ambiente sólo puede lograrse cuando el flujo radiante emitido es mayor que el absorbido. Esto implica que la ganancia de calor, debida a la absorción solar y atmosférica, así como a la convección y conducción, debe ser menor que el flujo radiado por la superficie. La mayoría de los materiales absorben parcialmente la luz del Sol y por eso se calientan cuando se exponen a su luz directa. Para lograr enfriar una superficie por debajo de la temperatura ambiente, aun estando expuesta a la luz solar directa, se requiere una absorción casi nula en todo el espectro solar ($0,3\ \mu\text{m}$ a $2,5\ \mu\text{m}$), mientras que la emisividad en la IRAW debe ser casi perfecta. Sólo en esta situación, la ganancia de calor debida a la absorción solar es sobrepasada por la pérdida de calor por radiación infrarroja (siempre y cuando no haya ganancias de calor por conducción y convección), dando lugar a una disminución de la temperatura superficial por debajo de la temperatura ambiente.

Encontrar o diseñar materiales que no absorban luz en el espectro solar y que al mismo tiempo emitan de forma óptima en la IRAW no es una tarea fácil. Es por esto que, a pesar de que el enfriamiento radiante se conoce desde la antigüedad, sólo en 2014 se demostró experimentalmente por primera vez que era posible enfriar pasivamente una superficie por debajo de la temperatura ambiente durante el día, aun expuesta a la luz solar directa [4].

Los materiales ERD son, por tanto, sistemas de enfriamiento pasivos, que pueden trabajar sin conexión a la red eléctrica y sin consumo de agua, por lo que su uso puede proporcionar múltiples beneficios económicos y medioambientales. Debido a que ofrecen una potencia de enfriamiento continua las 24 horas del día, su aplicación es particularmente efectiva para la disipación del calor en procesos industriales, plantas de energía y centros de datos, en los cuales el calor se genera de manera continua e independientemente de las condiciones climáticas. Otro ámbito de aplicación importante de las tecnologías ERD es la reducción de la demanda energética en los edificios, que son los responsables de aproximadamente el 40 % del consumo energético y del 36 % de las emisiones de gases de efecto invernadero en la UE. En este caso, para reducir la demanda de refrigeración, se puede considerar la integración directa de materiales ERD, o bien de sistemas con circulación activa de aire o agua refrigerados mediante emisión de radiación. Esta segunda opción puede ser conveniente para reducir la penalización en

la demanda de calefacción por el uso de los ERD en lugares con inviernos fríos, ya que permiten eliminar la fuente del enfriamiento, parando la circulación del fluido.

En este trabajo se describen distintos materiales de enfriamiento radiante diurno (ERD) y se analizan los retos metrológicos que plantea la caracterización de estos materiales y la evaluación del potencial de enfriamiento de los sistemas asociados. Estos retos deben ser superados para una implementación real de los materiales y tecnologías ERD, que pueda representar una aportación eficaz a la lucha y la resistencia frente al cambio climático.

2. MATERIALES DE ENFRIAMIENTO RADIANTE DIURNO

En 2014, un equipo de científicos de la Universidad de Stanford [4] desarrolló una estructura fotónica multicapa que presenta una alta reflectancia para todo el espectro solar y una fuerte emisividad térmica en la ventana atmosférica infrarroja (IRAW). Esta consta de siete capas dieléctricas depositadas sobre un espejo de plata. Cuando expusieron este material al cielo, en una azotea, midieron su temperatura, que disminuyó 5 °C por debajo de la temperatura ambiente bajo una irradiancia solar directa de 900 W.m⁻². A partir de entonces, se han desarrollado numerosos materiales ERD. Algunos ejemplos son las estructuras nano-fotónicas metalo-dieléctricas [2] y las heteroestructuras de capas delgadas, con patrones hechos por litografía [5-8]. Generalmente, estas estructuras están elaboradas con materiales dieléctricos como el Al₂O₃, el Si₃N₄ o el SiO₂, que son químicamente inertes, duraderos y altamente transparentes en el espectro solar. Los espesores de estas multicapas suelen estar optimizados para obtener una alta emisividad en la IRAW y son depositadas sobre espejos metálicos de plata (Ag) o de aluminio (Al), para reflejar el espectro solar.

Sin embargo, estas tecnologías requieren procesos de nano y microfabricación sofisticados, que dificultan su aplicación a gran escala. Otra manera más viable de fabricar materiales ERD es por medio de micro-esferas dieléctricas, ya sea auto-ensambladas en patrones periódicos [9,10], o depositadas de forma aleatoria y desordenada sobre un sustrato recubierto de un espejo de plata [11]. Además, metamateriales desordenados y formulaciones que se pueden aplicar como una pintura, formando una capa lo suficientemente gruesa para reflejar de forma difusa el espectro solar, han sido desarrollados integrando micro y nanoesferas de SiO₂, Al₂O₃, CaCO₃ y BaSO₄ [12-15]. También se han desarrollado materiales para enfriamiento radiante basados en aerogeles [16,17] y polímeros porosos [18-21].

Gracias al desarrollo de estos materiales, el enfriamiento radiante se ha posicionado en los últimos años como una solución prometedora en el ámbito de la investigación de energías renovables. Naturalmente, la comunidad científica ha dedicado esfuerzos a desarrollar materiales que no sean solamente eficientes en conseguir enfriamiento radiante, sino que también sean sostenibles. En esta dirección se han desarrollado

materiales híbridos basados en celulosa, donde esta última sirve como matriz y/o material dispersivo, a la cual se incorporan partículas polares de Al_2O_3 , TiO_2 o SiO_2 para maximizar la emisividad en la IRAW [22-26]. Recientemente, se ha logrado obtener un material que tiene ambas funcionalidades, basado puramente en celulosa porosa, elaborado por separación de fase, un método escalable y económico [27].

3. RETOS METROLÓGICOS PLANTEADOS POR LAS TECNOLOGÍAS ERD

Los dispositivos pasivos de enfriamiento radiante diurno representan una tecnología disruptiva que escapa a los esquemas de clasificación y a las metodologías de evaluación actuales. Los principales retos metrológicos que plantea esta nueva tecnología se refieren, por un lado, a la caracterización termo-óptica de los materiales ERD y, por otro lado, a la evaluación de su rendimiento de enfriamiento.

3.1. Retos relativos a la caracterización termo-óptica de los materiales ERD

El comportamiento de los materiales ERD viene definido por su reflectancia en el rango de la radiación solar (longitud de onda entre $0,3 \mu\text{m}$ y $2,5 \mu\text{m}$) y por su emitancia en el rango infrarrojo, especialmente en la ventana de transparencia atmosférica de $8 \mu\text{m}$ a $13 \mu\text{m}$. Por lo tanto, para obtener una caracterización fiable de este nuevo tipo de materiales, se debe optimizar la medida de estos dos parámetros en un amplio rango de longitudes de onda.

Uno de los aspectos a mejorar en este ámbito es la medida de la dependencia angular de la emitancia, ya que algunos estudios recientes sugieren que esta dependencia afecta significativamente a la potencia de enfriamiento neta en condiciones adversas de humedad o temperatura [28]. Otro reto, especialmente significativo en el sector de la edificación, es que para calcular el balance térmico es necesario conocer la emisividad hemisférica total del material, en todas las longitudes de onda y en todas las direcciones. El proyecto EMPIR 16NRM06 EMIRIM analizó la extrapolación de esta magnitud, a partir de la emisividad cuasi-normal que se mide con los equipos habituales, para el caso de láminas exteriores reflectantes de los productos de aislamiento térmico de edificios. Los resultados del proyecto indicaron limitaciones significativas para esta extrapolación, que es de esperar que se agraven, en el caso de los sistemas ERD.

Por otro lado, debido a que las soluciones de ERD tienen su aplicación en ambiente exterior, en muchos casos es necesario caracterizarlos mediante medidas de campo. Estas medidas implican el uso de instrumentación y equipamiento portátil y, en la mayoría de los casos de interés práctico, de equipos comerciales como los que se muestran en la figura 2. Sin embargo, estos equipos no están diseñados para esta

aplicación específica, ni para las peculiaridades de esta nueva clase de materiales. Por ello, es necesario optimizar la metodología de caracterización de materiales ERD mediante medidas de campo. En este sentido, resulta imprescindible definir y fabricar sistemas de ERD “modelo”, reproducibles, y caracterizarlos mediante equipos de laboratorio de altas prestaciones. Estos sistemas servirán como referencia en la calibración de los equipos portátiles y también en la evaluación comparativa de distintos materiales.

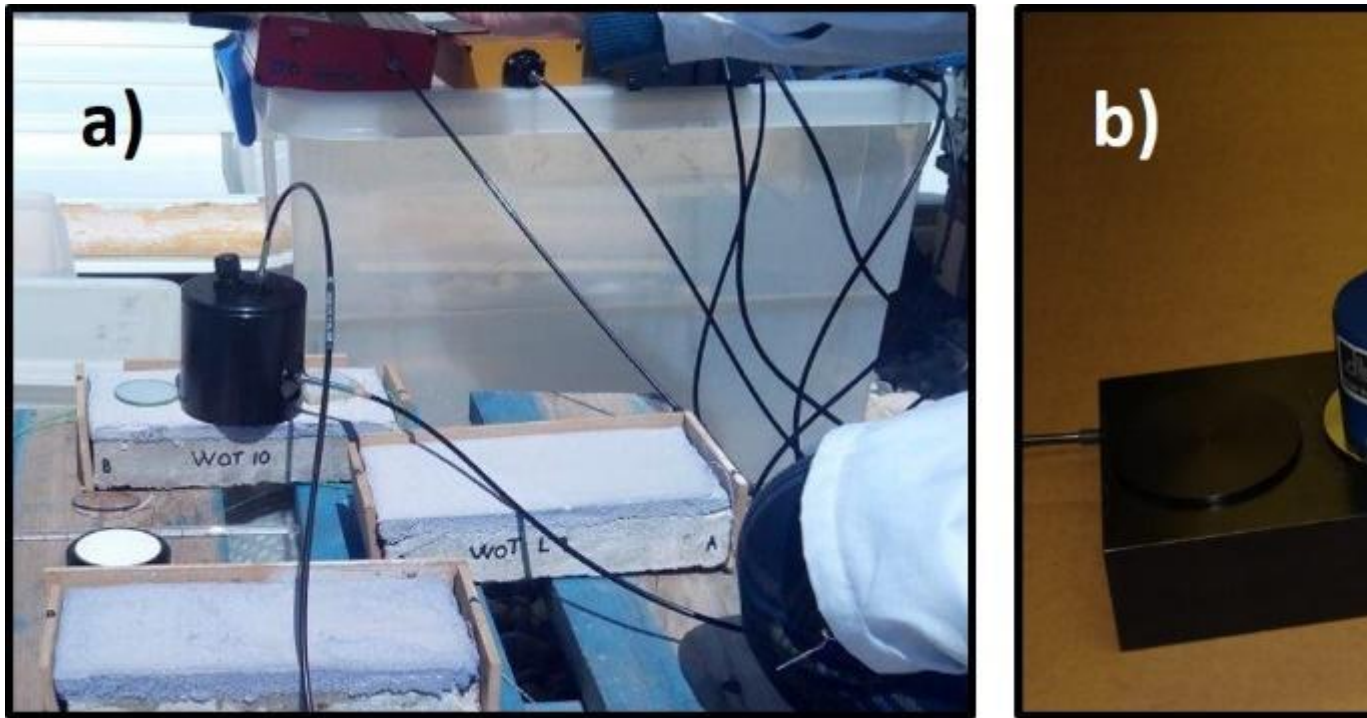


Figura 2. a) Medida de campo, de reflectancia, mediante un espectrómetro de fibra óptica comercial; b) Equipo portátil comercial para la medida de la emisividad.

3.2. Retos relativos a la evaluación del rendimiento de enfriamiento

La evaluación del rendimiento de enfriamiento de los materiales ERD, en los trabajos publicados hasta el momento, se realiza mediante dispositivos de ensayo muy variados. En términos generales, se pueden clasificar en los cuatro tipos de configuraciones que se esquematizan en la figura 3, adaptada de las referencias [29,30]. En los casos en los que se pretende disminuir la temperatura de un soporte determinado, simplemente se expone directamente la superficie del material ERD al ambiente exterior (figura 3.a).

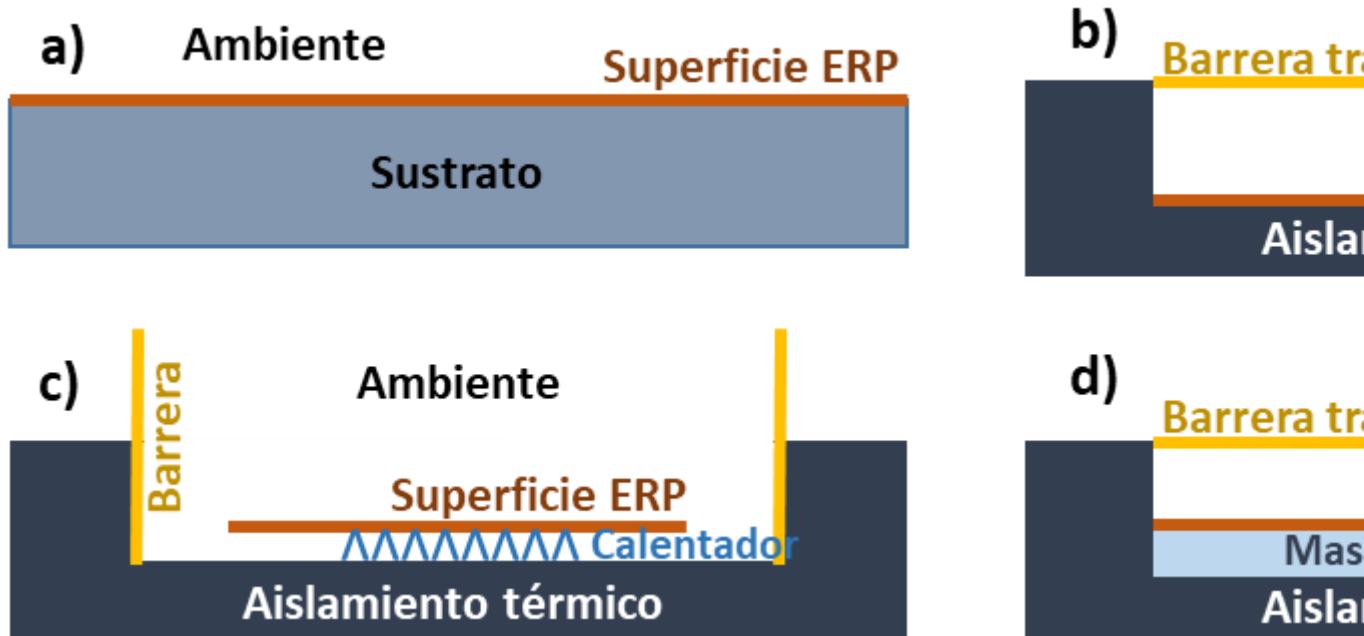


Figura 3. Configuraciones para la evaluación del rendimiento de enfriamiento de materiales ERD. Adaptada de [29,30].

En el caso de aplicaciones en las que se pretende conseguir temperaturas muy por debajo del ambiente, se deben implementar mecanismos que eliminen la transferencia de calor no radiativa con el entorno. Para ello se utilizan dispositivos como el de la figura 3.b), en los que el material ERD se encuentra aislado térmicamente del entorno, excepto en la superficie que se orienta hacia el espacio. En la parte superior del dispositivo se implementa un material de protección, unos centímetros por encima de la superficie radiante, de manera que el volumen entre dicha superficie y el material que actúa como barrera quede lleno de aire o en vacío. De esta manera, cuando se alcanzan temperaturas por debajo del ambiente, esta protección evita que el ambiente caliente el material ERD mediante fenómenos de conducción o de convección. Por otro lado, actúa como protección frente a agentes agresivos del entorno, como el polvo o el vapor de agua. El material más utilizado para esta aplicación, hasta el momento, es la lámina de polietileno, pero se han estudiado otros posibles materiales para mejorar sus prestaciones como protección [31]. En general, deben ser materiales con una alta transmitancia en el rango infrarrojo, en el que el material ERD emite la energía térmica, y capaces de resistir las condiciones de aplicación, tanto en términos de sus propiedades mecánicas, como de su durabilidad frente a los citados agentes agresivos, con espesores menores de 30 μm .

Otra opción para evaluar los materiales ERD consiste en caracterizar su potencia de enfriamiento, con dispositivos del tipo esquematizado en la figura 3.c), similar al de la figura 3.b), en el que se elimina el material que hace de barrera para las pérdidas no radiantes y se incluye un calentador que mantiene la muestra a temperatura ambiente [30]. De esta manera, se obtiene directamente la potencia de enfriamiento a partir de la potencia consumida por el calentador. Esta opción tiene la ventaja de que, en ausencia de viento, se eliminan las pérdidas por convección en la superficie, al mantener la muestra en equilibrio térmico con el ambiente. Por último, en los casos en los que se pretende enfriar un elemento con una masa térmica elevada, como puede ser un

determinado volumen de agua, éste se implementa en el dispositivo, como se muestra en la figura 3.d).

Para evaluar el comportamiento de cualquiera de estos tipos de dispositivos, es necesario monitorizar la temperatura ambiente y también las temperaturas en los distintos componentes del sistema, para lo que habitualmente se utilizan termopares. Por otro lado, en aplicaciones diurnas, se debe monitorizar la radiación solar directa y difusa que incide sobre el material ERD, generalmente mediante piranómetros. Por último, se deben monitorizar las condiciones del ambiente exterior que afectan al mecanismo de enfriamiento radiante, fundamentalmente la humedad relativa. Para evitar el sobrecalentamiento de los dispositivos, se suelen separar y aislar del suelo y también se suelen cubrir con materiales de alta reflexión solar como, por ejemplo, láminas de aluminio.

A pesar de las características comunes empleadas en algunos ensayos publicados, existe una gran variabilidad en los parámetros de construcción del dispositivo y en las condiciones de exposición al exterior. En algunos casos, el material se expone al cielo sólo parcialmente, bien debido a edificios próximos, o bien intencionadamente para re-direccionar la emisión térmica a ángulos grandes hacia el cielo, utilizando guías de onda de radiación infrarroja [32,33]. Otros autores llevan a cabo la evaluación del rendimiento en ubicaciones especialmente favorables, pero poco representativas, como son las regiones desérticas de gran altitud [17]. Por otro lado, las diferentes posiciones y configuraciones de los sensores de temperatura, así como los diferentes espesores del sustrato y cargas térmicas empleadas, hacen difícil comparar los resultados publicados por los distintos grupos que trabajan en este ámbito. Por ello, el principal reto en el ámbito de la evaluación del rendimiento de enfriamiento es definir unas condiciones de ensayo homogéneas, que permitan comparar el comportamiento de distintos materiales ERD, y de cada tipo de material, en distintas ubicaciones [34].

Otro reto importante es la falta de parámetros de caracterización adecuados para definir el rendimiento de los materiales ERD. Los parámetros basados en la capacidad de enfriamiento máxima, en equilibrio con una fuente de calor, o bien, en la máxima diferencia de temperatura entre el sustrato y el ambiente, proporcionan una imagen incompleta del rendimiento de refrigeración del material en condiciones reales.

El Índice de Reflectancia Solar (IRS) normalizado, que se utiliza habitualmente para evaluar y comparar los productos de tejados fríos y su medida, tampoco es adecuado para materiales de enfriamiento por debajo del ambiente, ya que no considera la ventana atmosférica del infrarrojo, ni otras variaciones de las condiciones ambientales.

Se han publicado recientemente algunos intentos preliminares para abordar la falta de procedimientos normalizados, considerando coeficientes de rendimiento en condiciones ideales [30,35,36]. Sin embargo, estos enfoques no han sido validados frente a recubrimientos o emisores normalizados y los parámetros propuestos no son capaces de diferenciar entre emitancia hemisférica y cuasi-normal, ni entre emisores selectivos (con alta emisividad en la ventana de transparencia atmosférica) y de banda ancha. Además, no consideran ciertos parámetros ambientales como la humedad relativa. Otros parámetros intrínsecos propuestos hasta el momento, podrían servir como valores de

referencia teóricos, para la comprensión de estos materiales y de sus límites de rendimiento, pero son de escaso interés práctico para empresas que necesitan ensayar y comercializar estos productos.

4. PROPUESTAS PARA ABORDAR LOS RETOS METROLÓGICOS

El alcance de los retos metrológicos planteados por las tecnologías de enfriamiento radiante diurno y el amplio espectro de actividades y áreas científicas involucradas, hacen necesario un esfuerzo colectivo, en el marco de un consorcio multidisciplinar, para conseguir avances significativos. Con este objetivo se han planteado distintos proyectos con participación de grupos españoles. Recientemente, ha concluido el proyecto AEVOMETA, “Algoritmos EVOLutivos aplicados a dispositivos de enfriamiento radiante pasivo ultracompactos basados en METAsuperficies”, financiado por el Gobierno de Navarra, cuyo objetivo principal fue aplicar algoritmos de computación evolutiva para el desarrollo de dispositivos de enfriamiento radiante ultracompactos y con capacidades de refrigeración superiores al estado actual de la técnica.

Actualmente, está en marcha el proyecto MIRACLE, “Photonic Metaconcrete with Infrared RADIative Cooling capacity for Large Energy savings”, financiado en el marco europeo Horizonte 2020 (Grant agreement ID: 964450) y que está coordinado por el Centro de Física de Materiales de CSIC-UPV/EHU. El proyecto plantea el desarrollo de un dispositivo de enfriamiento radiante diurno basado en lo que denominan meta-hormigones fotónicos y la fabricación de un prototipo, cuyo rendimiento de refrigeración se validará en la cubierta de un edificio real.

Recientemente ha sido aprobado el proyecto 21GRD03 PaRaMetriC, “Metrological framework for passive radiative cooling technologies” en la convocatoria Partnership in Metrology – Metrology for Green Deal (2021), coordinado por el INRiM (Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica) de Italia y en el que participan los autores del presente trabajo.

Entre otras actividades, en el Proyecto PaRaMetriC se definirán parámetros de caracterización adecuados para predecir el efecto de los parámetros externos sobre la capacidad de refrigeración de los materiales ERD. Por otro lado, se identificarán y fabricarán materiales de referencia, que se caracterizarán detalladamente con respecto a sus propiedades ópticas, de infrarrojo, y también sus propiedades térmicas, incluyendo la medida de su conductividad. Asimismo, se caracterizará su rendimiento, para identificar aquellos más estables y reproducibles, con una capacidad de enfriamiento neta medible. De esta manera, se podrá obtener un material de referencia validado, frente al cual se podrán comparar los ERD en el futuro.

Se considerará la distribución angular de la radiación solar e infrarroja que proviene de diferentes ángulos sobre el horizonte, para determinar la orientación relativa óptima entre los dispositivos ERD y el cielo, en diferentes latitudes. Asimismo, se medirá la dependencia angular de la emisividad de materiales seleccionados, utilizando las configuraciones optimizadas en el proyecto EMIRIM. Los resultados permitirán desarrollar métodos para evaluar la emisividad hemisférica, a partir de los valores direccionales limitados que proporcionan los equipos comerciales y portátiles disponibles actualmente. En paralelo, se prevé comparar las medidas precisas y trazables, realizadas en laboratorio, con las obtenidas in-situ, con instrumentos portátiles. De esta manera, se identificarán los errores que conlleva el uso de los instrumentos comerciales que están disponibles para estas aplicaciones.

Por último, se considerarán las condiciones de uso reales, en el diseño de los dispositivos y protocolos para la evaluación del rendimiento de refrigeración de los materiales ERD. En este sentido, se proporcionarán especificaciones sobre el tipo de aislamiento térmico, su apantallamiento, la carga térmica y el tipo y posición de los sensores empleados. Los protocolos y prototipos previstos se enfocarán a la aplicación en ambiente exterior y se basarán en sistemas modulares que permitan implementar distintos materiales y mejorar de esta manera la reproducibilidad de los ensayos. Por último, los materiales que presenten una potencia de enfriamiento neta, se someterán a un conjunto completo de ensayos de envejecimiento acelerado y serán caracterizados de nuevo para evaluar la degradación de su rendimiento.

5. CONCLUSIONES

Los materiales de enfriamiento radiante diurno (ERD) de última generación permiten obtener temperaturas superficiales por debajo del ambiente, incluso durante el día y estando bajo la irradiación del Sol. Representan por ello una inigualable oportunidad de reducir la contribución de edificios e infraestructuras al calentamiento global.

Sin embargo, la implementación de estos materiales en aplicaciones reales sólo será posible si se superan los retos que plantea su fabricación, así como los retos metrológicos asociados con su caracterización y la evaluación de su potencial de enfriamiento. Los autores participan en una propuesta para abordar estos retos metrológicos en el ámbito europeo, cuyos resultados pueden proporcionar el avance definitivo hacia la implementación real de los ERD.

6. BIBLIOGRAFÍA

[1] C. Mora et al. “Broad threat to humanity from cumulative climate hazards intensified by greenhouse gas emissions”. *Nat. Clim. Change* 8, 1062 (2018).

[2] IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

- [3] International Energy Agency (2018). The Future of Cooling: Opportunities for energy-efficient air conditioning.
- [4] A.P. Raman, M.A. Anoma, L. Zhu, E. Rephaeli, S. Fan, “Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight”. *Nature* 515, 540–544 (2014).
- [5] E. Rephaeli, A. Raman, S. Fan. “Ultrabroadband Photonic Structures To Achieve High-Performance Daytime Radiative Cooling”. *Nano Letters* 13, 1457–1461 (2013).
- [6] Md. M. Hossain, B. Jia, M. Gu, “A Metamaterial Emitter for Highly Efficient Radiative Cooling” *Adv. Opt. Mater.* 2015, 3, 1047
- [7] A. Hervé, J. Dré villon, Y. Ezzahri, K. Joulain “Radiative cooling by tailoring surfaces with microstructures: Association of a grating and a multi-layer structure”. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* (2018).
- [8] E. Blandre, R.A. Yalçın, K. Joulain,, J. Dré villon, “Microstructured surfaces for colored and non-colored sky radiative cooling,” *Opt. Express* 28, 29703-29713 (2020)
- [9] J. Jaramillo-Fernandez, G. L. Whitworth, J. A. Pariente, A. Blanco, P. D. Garcia, C. Lopez, C. M. Sotomayor-Torres, “A Self-Assembled 2D Thermofunctional Material for Radiative Cooling” *Small*, 15, 1905290 (2019)
- [10] G. L. Whitworth, J. Jaramillo-Fernandez, J. A. Pariente, P. D. Garcia, A. Blanco, C. Lopez, C. M. Sotomayor-Torres, “Simulations of micro-sphere/shell 2D silica photonic crystals for radiative cooling” *Opt. Express*, 29, 16857 (2021).
- [11] Y. Zhai, Y. Ma, S. N. David, D. Zhao, R. Lou, G. Tan, R. Yang, X. Yin, “Scalable-manufactured randomized glass-polymer hybrid metamaterial for daytime radiative cooling” *Science*, 335, 1062 (2017).
- [12] S. Atiganyanun et al. “Disordered metamaterial coating for daytime passive radiative cooling” *ACS Photonics* 5, 1181 (2018)
- [13] S. Atiganyanun et al. “Effective Radiative Cooling by Paint-Format Microsphere-Based Photonic Random Media”. *ACS Photonics* 5, 1181–1187 (2018).
- [14] Z. Huang, X. Ruan, “Nanoparticle embedded double-layer coating for daytime radiative cooling” *International Journal of Heat and Mass Transfer* 104, 890–896 (2017).
- [15] X. Li, J. Peoples, P. Yao, X. Ruan, “Ultrawhite BaSO₄ Paints and Films for Remarkable Daytime Subambient Radiative Cooling” *ACS applied materials & interfaces*. (2021)

- [16] M. Yang, W. Zou, J. Guo, Z. Qian, H. Luo, S. Yang, N. Zhao, L. Pattelli, J. Xu, D. S. Wiersma "Bioinspired "Skin" with Cooperative Thermo-Optical Effect for Daytime Radiative Cooling" *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 12, 25286 (2020).
- [17] A. Leroy et al. "High-performance subambient radiative cooling enabled by optically selective and thermally insulating polyethylene aerogel". *Science Advances* 5, eaat9480 (2019).
- [18] D. Li, X. Liu, W. Li, Z. Lin, B. Zhu, Z. Li, J. Li, B. Li, S. Fan, J. Xie, J. Zhu "Scalable and hierarchically designed polymer film as a selective thermal emitter for high-performance all-day radiative cooling" *Nat. Nanotechnol.*, 16, 153 (2021)
- [19] J. Mandal et al. "Hierarchically porous polymer coatings for highly efficient passive daytime radiative cooling" *Science* 362, 315–319 (2018).
- [20] J. Mandal, Y. Yang, N. Yu, A.P. Raman. "Paints as a scalable and effective radiative cooling technology for buildings." *Joule* 4.7, 1350-1356. (2020)
- [21] W. Huang, Y. Chen, Y. Luo, J. Mandal, W. Li, M. Chen, C.C. Tsai, Z. Shan, N. Yu "Scalable Aqueous Processing-Based Passive Daytime Radiative Cooling Coatings" *Adv. Funct. Mater.*, 31, 2010334, (2021)
- [22] B. Xiang, R. Zhang, Y. Luo, S. Zhang, L. Xu, H. Min, S. Tang, X. Meng, "3D porous polymer film with designed pore architecture and auto-deposited SiO₂ for highly efficient passive radiative cooling" *Nano Energy*, 81, 105600 (2021)
- [23] Y. Chen, B. Dang, J. Fu, C. Wang, C. Li, Q. Sun, H. Li "Cellulose-Based Hybrid Structural Material for Radiative Cooling" *Nano Lett.*, 21(1) 397-404 (2021)
- [24] S. Gamage, E. S. H. Kang, C. Åkerlind, S. Sardar, J. Edberg, H. Kariis, T. Ederth, M. Berggren, M. P. Jonsson "Transparent nanocellulose metamaterial enables controlled optical diffusion and radiative cooling" *Mater. Chem. C*, 8, 11687 (2020)
- [25] S. Gamage, D. Banerjee, M. M. Alam, T. Hallberg, C. Åkerlind, A. Sultana, R. Shanker, M. Berggren, X. Crispin, H. Kariis, D. Zhao, M. P. Jonsson, *Cellulose*, 28, 9383 (2021)
- [26] W. Wei, Y. Zhu, Q. Li, Z. Cheng, Y. Yao, Q. Zhao, P. Zhang, X. Liu, Z. Chen, F. Xu, Y. Gao "An Al₂O₃-cellulose acetate-coated textile for human body cooling" *Solar Energy Mater. Solar Cells*, 211, 110525 (2020)
- [27] J. Jaramillo-Fernandez, H. Yang, L. Schertel, G. L. Whitworth, P. D. Garcia, S. Vignolini, C.M Sotomayor-Torres "Highly-Scattering Cellulose-Based Films for Radiative Cooling" *Adv. Science* 2104758. (2022).

- [28] T. Wang et al. "A structural polymer for highly efficient all-day passive radiative cooling." *Nature communications* 12.1, 1-11 (2021)
- [29] D. Zhao, A. Aili, Y. Zhai, S. Xu, G. Tan, X. Yin, R. Yang "Radiative sky cooling: Fundamental principles, materials, and applications" *Appl. Phys. Rev.* 6, 021306 (2019)
- [30] X. Li et al. "Full daytime sub-ambient radiative cooling in commercial-like paints with high figure of merit." *Cell Reports Physical Science* 1.10, 100221 (2020).
- [31] J. Zhang et al. "Cover shields for sub-ambient radiative cooling: A literature review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 143, 110959 (2021).
- [32] L. Zhou et al. "A polydimethylsiloxane-coated metal structure for all-day radiative cooling." *Nature Sustainability* 2.8, 718-724 (2019).
- [33] L. Zhou et al. "Hybrid concentrated radiative cooling and solar heating in a single system." *Cell Reports Physical Science* 2.2, 100338 (2021).
- [34] X. Yin et al. "Terrestrial radiative cooling: Using the cold universe as a renewable and sustainable energy source." *Science* 370.6518, 786-791 (2020).
- [35] X. Zhang et al. "Wrinkled surface microstructure for enhancing the infrared spectral performance of radiative cooling." *Optics Express* 29.8, 11416-11432 (2021).
- [36] X. Huang, J. Mandal, A. Raman "Do-it-yourself radiative cooler as a radiative cooling standard and cooling component for device design" *J. of Photonics for Energy*, 12(1), 012112 (2021).