



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), julio-agosto 2026,
Volumen 10, Número 4.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i4

**MODELADO Y EVALUACIÓN DEL
ENFRIAMIENTO RADIATIVO PASIVO
DIURNO BAJO CONDICIONES
BAROMÉTRICAS DE ALTURA:
OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS
ENERGÉTICOS EN LA PAZ**

**MODELING AND EVALUATION OF PASSIVE DAYTIME
RADIATIVE COOLING UNDER HIGH-ALTITUDE
BAROMETRIC CONDITIONS: OPTIMIZATION OF ENERGY
SYSTEMS IN LA PAZ**

Ruben Yahuita Mattos

Carrera de Ingeniería Mecánica y Electromecánica

Bonifacio Gerardo Copa Quispe

Carrera de Ingeniería Mecánica y Electromecánica

Jaime Eduardo Sánchez Guzmán

Carrera de Ingeniería Mecánica y Electromecánica

Modelado y evaluación del enfriamiento radiativo pasivo diurno bajo condiciones barométricas de altura: optimización de sistemas energéticos en La Paz

Ruben Yahuita Mattos¹

rubenyahuitamattos@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0003-5381-8762>

Carrera de Ingeniería Mecánica y

Electromecánica

Universidad Mayor de San Andrés

La Paz – Bolivia

Bonifacio Gerardo Copa Quispe

ing.bonifaciocopa@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0008-5457-839X>

Carrera de Ingeniería Mecánica y

Electromecánica

Universidad Mayor de San Andrés

La Paz – Bolivia

Jaime Eduardo Sánchez Guzmán

jedsanguz@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0000-6204-3610>

Carrera de Ingeniería Mecánica y

Electromecánica

Universidad Mayor de San Andrés

La Paz - Bolivia

RESUMEN

El presente artículo evalúa el potencial del enfriamiento radiativo pasivo diurno (PDRC) bajo las condiciones barométricas singulares de la ciudad de La Paz (3.865 m.s.n.m.), con el objetivo de determinar cómo la baja presión atmosférica e higrométrica del Altiplano influye en el balance energético de superficies selectivas y en la optimización de sistemas fotovoltaicos. La metodología integró un modelado numérico determinístico en estado transitorio, desarrollado en MATLAB, junto con una fase experimental de campo en la que se evaluó un prototipo recubierto con Sulfato de Bario (BaSO_4) y Carbonato de Calcio (CaCO_3), incorporando el recálculo de los coeficientes de transferencia de calor ajustados a la presión barométrica real registrada (72,79 kPa) y a una densidad del aire de 0,845 kg/m^3 . Los resultados experimentales demostraron que la atmósfera del Altiplano constituye una ventaja termodinámica, permitiendo alcanzar una temperatura mínima absoluta de $-10,45^\circ\text{C}$ y un diferencial térmico sub-ambiente de $25,06^\circ\text{C}$, superior a los valores reportados en climas de baja altitud. Asimismo, se determinó que la integración del recubrimiento radiativo eleva la eficiencia eléctrica media de módulos fotovoltaicos de 16,59 % a 19,35 %, un incremento neto de 16,63 %. Se concluye que La Paz posee condiciones excepcionales para la implementación de tecnologías PDRC de bajo costo, ofreciendo una alternativa sustentable para mejorar la eficiencia de sistemas energéticos en regiones de gran altitud.

Palabras clave: enfriamiento radiativo; presión barométrica; balance energético; superficies selectivas; eficiencia fotovoltaica.

¹ Autor principal.

Correspondencia: rubenyahuitamattos@gmail.com

Modeling and evaluation of passive daytime radiative cooling under high-altitude barometric conditions: optimization of energy systems in La Paz

ABSTRACT

This article evaluates the potential of passive daytime radiative cooling (PDRC) under the unique barometric conditions of the city of La Paz (3,865 m.a.s.l.), aiming to determine how the low atmospheric and hygrometric pressure of the Altiplano influences the energy balance of selective surfaces and the optimization of photovoltaic systems. The methodology integrated a deterministic transient-state numerical model developed in MATLAB together with an experimental field phase in which a prototype coated with Barium Sulfate (BaSO_4) and Calcium Carbonate (CaCO_3) was evaluated. The model incorporated the recalculation of heat transfer coefficients adjusted to the actual measured barometric pressure (72.79 kPa) and an air density of 0.845 kg/m^3 , significantly reducing the system's parasitic convective losses. Experimental results showed that the Altiplano atmosphere constitutes a thermodynamic advantage, reaching an absolute minimum temperature of -10.45°C and a sub-ambient thermal differential of 25.06°C , higher than values reported for low-altitude climates. It was also determined that integrating the radiative coating raises the average electrical efficiency of photovoltaic modules from 16.59 % to 19.35 %, a net increase of 16.63 %. It is concluded that La Paz has exceptional conditions for implementing low-cost PDRC technologies, offering a sustainable alternative to improve the efficiency of energy systems at high altitude.

Keywords: radiative cooling; barometric pressure; energy balance; selective surfaces; photovoltaic efficiency.

*Artículo recibido 20 mayo 2026
Aceptado para publicación: 20 junio 2026*



INTRODUCCIÓN

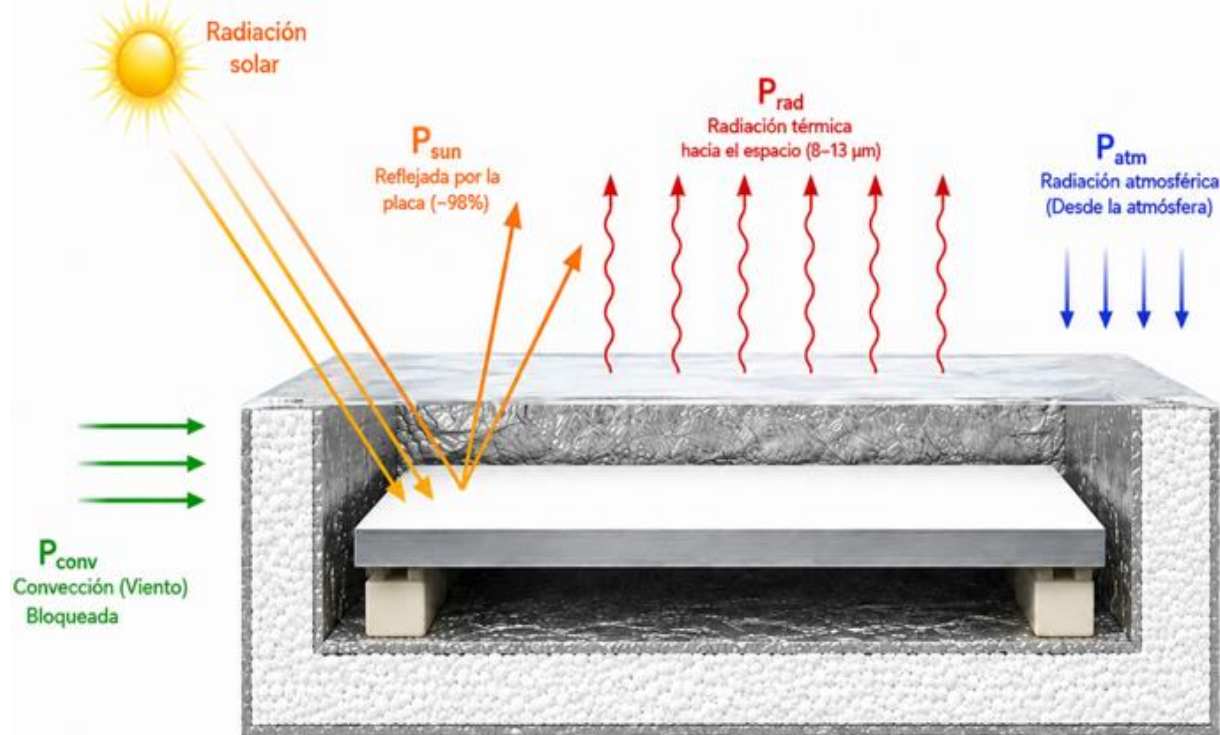
El incremento sostenido de 1,1 °C en la temperatura media global, junto con una demanda de refrigeración que representa ya cerca del 10 % del consumo eléctrico mundial, ha convertido la gestión térmica pasiva en una prioridad de la ingeniería mecánica y electromecánica contemporánea (Aili et al., 2024). En el sector de la edificación, los sistemas convencionales de climatización pueden llegar a representar hasta el 40 % del consumo de energía primaria (Lu et al., 2021). En este contexto emerge el enfriamiento radiativo pasivo diurno (Passive Daytime Radiative Cooling, PDRC), una tecnología que utiliza el cielo como sumidero térmico a temperaturas cercanas al cero absoluto, aprovechando la ventana de transparencia atmosférica entre 8 y 13 μm para disipar calor incluso bajo radiación solar directa (Hossain & Gu, 2016).

La ciudad de La Paz, situada por encima de los 3.600 metros sobre el nivel del mar, presenta condiciones barométricas e higrométricas singulares: la reducida presión atmosférica y la baja humedad del Altiplano disminuyen la densidad del aire y optimizan la transmitancia infrarroja en comparación con localidades a nivel del mar (Bijarniya et al., 2020). Sin embargo, esta ventaja termodinámica no había sido cuantificada previamente para condiciones locales, dado que la mayoría de los modelos internacionales de PDRC asumen presión atmosférica estándar (1 atm) y humedad relativa elevada. En paralelo, en el sector fotovoltaico el sobrecalentamiento de los módulos solares constituye uno de los principales factores de pérdida de eficiencia y degradación prematura de los componentes electromecánicos; se estima que hasta el 80 % de la irradiancia solar captada por estos activos se transforma en carga térmica residual en lugar de electricidad (Huang et al., 2024). La incorporación de recubrimientos de enfriamiento radiativo ha demostrado reducciones de temperatura de hasta 18,3 °C en celdas solares, con el consecuente incremento de la producción eléctrica anual (Huang et al., 2024; Wang et al., 2024). El marco científico de este problema se sustenta en el balance de energía superficial: el enfriamiento radiativo ocurre cuando la potencia emitida por una superficie (P_{rad}) supera la suma de las potencias absorbidas de la atmósfera (P_{atm}), del sol (P_{sol}) y las ganancias por calor sensible; para lograr un descenso sub-ambiente diurno, la potencia neta debe ser positiva hacia el exterior (Aili et al., 2024) (Figura 1). A partir de la ley de Stefan-Boltzmann y de la ley de distribución de Planck, se ha establecido que una superficie a temperatura ambiente (~ 300 K) emite su máxima potencia radiativa cerca de las 10 μm ,

coincidiendo con la ventana de transparencia atmosférica de 8 a 13 μm en la que el aire es casi transparente a la radiación de onda larga (Lee et al., 2023). Esta coincidencia espectral explica por qué las superficies con alta emisividad térmica selectiva y alta reflectancia solar ($\rho > 0,95$) pueden alcanzar temperaturas sub-ambiente incluso bajo insolación directa (Li et al., 2020; Mandal et al., 2018).

Figura 1.

Balance de flujos energéticos en la superficie del módulo de enfriamiento radiativo pasivo



Nota. P_{sun} representa la fracción de radiación solar reflejada por la superficie selectiva (~98 %); P_{rad} es la potencia radiada hacia el espacio en la ventana atmosférica de 8-13 μm ; P_{atm} es la contra-radiación atmosférica absorbida; y P_{conv} la ganancia convectiva bloqueada por el escudo de LDPE. Elaboración propia.

En el plano de los materiales, la tecnología PDRC ha evolucionado desde estructuras fotónicas complejas hacia recubrimientos escalables de bajo costo basados en pigmentos dispersores. Zhao et al. (2023) desarrollaron un vidrio de enfriamiento microporoso con estabilidad ambiental prolongada, mientras que Mandal et al. (2018) demostraron que recubrimientos poliméricos porosos alcanzan potencias netas cercanas a 96 W/m^2 y descensos sub-ambiente de 6 $^{\circ}\text{C}$. Li et al. (2020) validaron que una pintura de bajo costo basada en CaCO_3 y acrílico logra una reflectancia solar de 95,5 % y una potencia de enfriamiento superior a 37 W/m^2 , mientras que Joseph et al. (2023) compararon experimentalmente pinturas de BaSO_4 y CaCO_3 bajo clima tropical, reportando descensos de hasta -6,1

°C y -6,0 °C respectivamente, lo que sugiere una equivalencia funcional entre ambos pigmentos. Respecto a la integración con sistemas fotovoltaicos, Wang et al. (2024) diseñaron un sistema híbrido que, mediante el redireccionamiento de la radiación reflejada hacia las celdas, incrementó la densidad de potencia de salida en 30,3 %, mientras que Farooq et al. (2023) estimaron ahorros de climatización de entre 76 y 113 kWh/(m²·año) mediante cubiertas frías.

Sin embargo, la revisión de la literatura evidencia una brecha crítica: la práctica totalidad de los modelos y validaciones experimentales de PDRC se ha desarrollado a nivel del mar o en climas tropicales y áridos de baja altitud, asumiendo presiones atmosféricas cercanas a 1 atm y concentraciones relativamente altas de vapor de agua (Cardemil et al., 2020). El comportamiento de la capa límite convectiva y de la emisividad efectiva del cielo en condiciones barométricas de gran altitud (~0,65 atm), como las de La Paz, permanecía prácticamente inexplorado, pese a que, de acuerdo con el modelo de Berdahl y Martin (citado en Cardemil et al., 2020), la emisividad del cielo depende de la temperatura del punto de rocío, la cual se reduce sustancialmente en atmósferas secas de altura.

Frente a este panorama, la investigación se orientó a responder la siguiente pregunta: ¿de qué manera las condiciones barométricas y de transparencia atmosférica de la ciudad de La Paz influyen en la viabilidad técnica del enfriamiento radiativo pasivo diurno, y cómo puede un modelo numérico optimizar el uso de BaSO₄ y CaCO₃ para mejorar el rendimiento de sistemas fotovoltaicos como base científica para la refrigeración de sistemas energéticos en gran altitud? El objetivo general fue evaluar el potencial del enfriamiento radiativo pasivo diurno con ambos materiales en la ciudad de La Paz mediante el modelado numérico y la optimización de sistemas fotovoltaicos. De manera específica, se buscó: a) modelar el comportamiento convectivo de la atmósfera paceña sobre superficies horizontales; b) cuantificar la potencia radiativa neta alcanzable bajo la radiación solar extrema del Altiplano; c) evaluar experimentalmente el rendimiento térmico comparativo de BaSO₄ y CaCO₃; y d) proyectar, mediante modelado numérico, la mejora en la eficiencia eléctrica de sistemas fotovoltaicos. El estudio se justifica por su pertinencia con la termodinámica de la transferencia de calor, por su relevancia socioeconómica al proponer una solución de refrigeración de costo operativo nulo para el Altiplano boliviano, y por su novedad, al constituir uno de los primeros estudios que cuantifica el potencial del PDRC aprovechando la singularidad barométrica de la ciudad de La Paz.

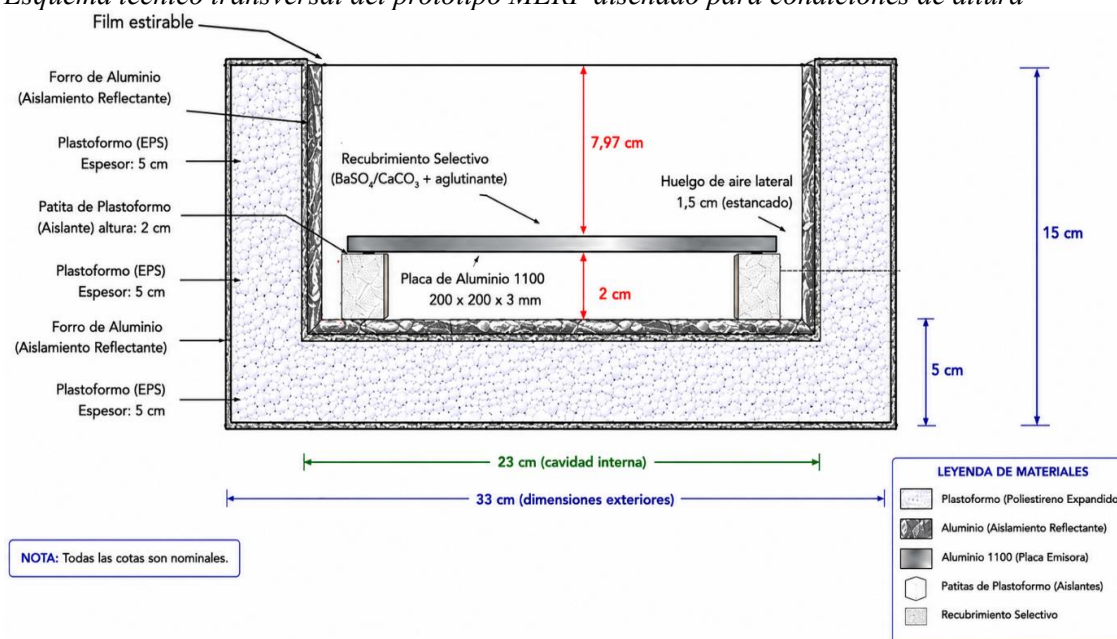
METODOLOGÍA

La investigación se clasifica como aplicada, de nivel correlacional y de enfoque cuantitativo, orientada a evaluar la relación de dependencia entre las variables atmosféricas locales (presión barométrica, humedad y transparencia del cielo) y la potencia neta de disipación térmica lograda por una superficie selectiva, mediante la recolección de datos experimentales y el desarrollo de un modelo matemático determinístico. El diseño fue cuasi-experimental de campo, con un enfoque longitudinal-transitorio: si bien se manipuló intencionalmente la composición del recubrimiento (BaSO_4 frente a CaCO_3), no existió control absoluto sobre variables exógenas como la irradiancia real o la nubosidad, lo que otorgó validez externa a los resultados obtenidos bajo el cielo real de La Paz.

La unidad de análisis fue el Módulo de Enfriamiento Radiativo Pasivo (MERP), compuesto por una placa de aluminio grado 1100 de 3 mm de espesor (200×200 mm, masa de 0,325 kg) recubierta con una mezcla de pigmento y aglutinante acrílico mate en proporción 60/40 en peso. La placa se alojó en una cámara aislante de poliestireno expandido de alta densidad (Tecnopor D-12, 50 mm de espesor), forrada internamente con lámina de aluminio reflectiva y protegida en su cara superior por un escudo convectivo de film de polietileno de baja densidad (LDPE) transparente al infrarrojo (Figura 2). Un espacio perimetral de 15 mm y una elevación de 20 mm sobre soportes poliméricos rompieron los puentes térmicos laterales e inferiores, respectivamente.

Figura 2.

Esquema técnico transversal del prototipo MERP diseñado para condiciones de altura



Nota. La cavidad interna de 23 cm alberga la placa de aluminio 1100 suspendida sobre separadores poliméricos, con un huelgo de aire lateral estancado de 1,5 cm y un aislamiento perimetral de poliestireno expandido (EPS) de 5 cm, forrado con lámina de aluminio reflectante y film estirable superior. Elaboración propia.

El muestreo fue no probabilístico intencional, constituido por el propio prototipo experimental evaluado en dos configuraciones (BaSO_4 y CaCO_3) bajo el cielo despejado de la zona de Vino Tinto (macrodistrito Periférica, ciudad de La Paz), sitio de ensayo situado a 3.865 m.s.n.m. ($-16,4802^\circ \text{ S}$, $-68,1325^\circ \text{ W}$). La adquisición de datos se automatizó mediante un microcontrolador ESP32 DevKit V1, que registró cada 5 minutos la temperatura de la placa y del aire interno (sensores digitales DS18B20, $\pm 0,5^\circ \text{ C}$) y la presión barométrica y humedad relativa del entorno (sensor BME280, $\pm 1,0 \text{ hPa}$), almacenando las series temporales en tarjeta microSD en formato CSV. El protocolo contempló ciclos de monitoreo de 24 a 48 horas continuas durante los días 11, 12, 14 y 15 de mayo de 2026, con una ventana crítica de evaluación entre las 11:00 y las 14:00 horas, descartándose los registros afectados por nubosidad o vientos extremos. El modelo matemático se formuló a partir del balance de energía en estado transitorio, resolviendo mediante MATLAB la ecuación diferencial de primer orden:

$$m \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt} = A \cdot [P_{rad}(T) - P_{atm}(T_{amb}) - P_{sol} - P_{conv} - P_{cond}]$$

Donde P_{rad} se calculó mediante la ley de Stefan-Boltzmann ($\epsilon \cdot \sigma \cdot T^4$), P_{atm} mediante el algoritmo de Berdahl y Martin en función de la temperatura del punto de rocío, P_{sol} como el producto de la absorptividad efectiva y la irradiancia global ($\alpha \cdot G$), P_{conv} mediante un coeficiente de convección recalculado dinámicamente a partir de la densidad local del aire y de los números adimensionales de Grashof, Rayleigh y Nusselt, ajustados para la presión barométrica real del sitio (65 a 73 kPa), y P_{cond} como la pérdida por conducción a través del aislante. La irradiancia solar global horizontal se estimó mediante el modelo de cielo claro de Hottel, con los coeficientes de altitud propuestos por Duffie y Beckman (2013), y se contrastó con registros de TuTiempo.net y de la base de datos NASA POWER. Las propiedades ópticas de entrada del modelo (emisividad infrarroja ϵ y reflectancia solar ρ) se tomaron inicialmente de la literatura (BaSO_4 : $\epsilon = 0,95$, $\rho = 0,98$; CaCO_3 : $\epsilon = 0,94$, $\rho = 0,95$; Aili et al., 2024; Joseph et al., 2023) y se ajustaron mediante calibración inversa a partir de los datos experimentales. La

validación del modelo se realizó mediante el error cuadrático medio (RMSE) y el error medio absoluto (MAE) entre las temperaturas simuladas y medidas, mientras que la significancia estadística de las diferencias de desempeño entre BaSO₄ y CaCO₃ se evaluó mediante un análisis de varianza (ANOVA) de un factor sobre el conjunto sincronizado de 1.103 registros. Finalmente, el modelo de acoplamiento térmico-fotovoltaico empleó la ecuación de Evans y Florschuetz (1977) para proyectar el incremento de eficiencia eléctrica de un panel de silicio monocristalino (eficiencia de referencia = 18 %, coeficiente de temperatura $\beta = 0,0045 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) al mitigar su temperatura de operación mediante los diferenciales térmicos medidos experimentalmente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización del sitio y del recurso radiativo

El sitio de ensayo (Vino Tinto, La Paz) se ubica a 3.865 m.s.n.m., con una presión atmosférica teórica de 65,20 kPa y una densidad del aire calculada de 0,789 kg/m³, un 35,6 % inferior al valor estándar de nivel del mar (1,225 kg/m³) (Tabla 1). El modelo de cielo claro de Hottel, calibrado con los coeficientes de altitud de Duffie y Beckman (2013), predijo una irradiancia solar pico promedio de 923,4 W/m² para los días de ensayo, con un error relativo de 7,87 % respecto a los registros de TuTiempo.net (850,7 W/m² en promedio) (Tabla 2). La emisividad efectiva del cielo, calculada mediante el algoritmo de Berdahl y Martin, arrojó un valor promedio de 0,714, sensiblemente inferior a los valores típicos de nivel del mar (> 0,85), confirmando una atmósfera altamente transparente en la ventana de 8-13 μm . Esta caracterización sustenta la premisa central de la investigación: la baja presión barométrica y la reducida humedad del Altiplano potencian, en lugar de limitar, la disipación radiativa hacia el espacio profundo.

Tabla 1.*Parámetros geográficos y barométricos del sitio de ensayo (Vino Tinto)*

Parámetro	Valor / descripción	Unidad
Ubicación	Zona Vino Tinto, La Paz – Bolivia	-
Altitud específica	3.865	m.s.n.m.
Latitud / Longitud	-16,4802 / -68,1325	°S / °W
Presión atmosférica absoluta teórica	65,20	kPa
Densidad del aire local (teórica)	0,789	kg/m ³
Presión barométrica media registrada (4 ciclos)	72,79	kPa
Densidad del aire local (real, promedio)	0,845	kg/m ³

Nota. Elaboración propia, basada en datos de NASA POWER y SENAMHI.

Tabla 2.*Irradiancia solar pico: modelo de Hottel vs. registros de referencia (mayo de 2026)*

Irradiancia solar pico: modelo de Holier vs. registros de referencia (mayo de 2020)							
Fecha	Día juliano (n)	Irrad.	máx.	Irrad.	máx.	TuTiempo	Error
		MATLAB (W/m²)		(W/m²)			relativo (%)
11 de mayo	131	928,4		862,0			7,16
12 de mayo	132	925,8		843,0			8,95
14 de mayo	134	920,9		852,0			7,48
15 de mayo	135	918,5		846,0			7,89
Promedio	-	923,4		850,7			7,87

Nota. Elaboración propia, mediante simulación en MATLAB y datos de TuTiempo.net.

Desempeño térmico: simulación teórica y validación experimental

La ejecución del modelo transitorio en MATLAB para un ciclo circadiano completo (1.440 minutos) permitió establecer el techo de desempeño teórico de cada recubrimiento: el Sulfato de Bario alcanzó una temperatura mínima simulada de -9,45 °C y un diferencial sub-ambiente teórico máximo de 21,80 °C, mientras que el Carbonato de Calcio alcanzó -8,58 °C y 18,50 °C, respectivamente (Tabla 3).

Tabla 3.*Resumen de hitos térmicos obtenidos mediante simulación determinística*

Material evaluado	Irradiancia (W/m ²)	Mínima T _{placa} (°C)	Diferencial máx. ΔT _{sub} (°C)
Sulfato de Bario (BaSO ₄)	928,4	-9,45	21,80
Carbonato de Calcio (CaCO ₃)	920,9	-8,58	18,50

Nota. Elaboración propia, mediante modelo transitorio en MATLAB.

Durante los cuatro ciclos de ensayo (11, 12, 14 y 15 de mayo de 2026) se procesó un total de 1.103 registros sincronizados de presión, humedad, irradiancia y temperatura. El Sulfato de Bario alcanzó una temperatura mínima absoluta de -10,45 °C el 11 de mayo, con un diferencial térmico sub-ambiente máximo de 25,06 °C —superior a los descensos de -6,0 a -6,1 °C reportados por Joseph et al. (2023) en clima tropical, y a los valores de -1,7 °C a -6 °C documentados por Li et al. (2020) y Mandal et al. (2018) a nivel del mar—, lo que confirma que la reducción de 28,1 % en la densidad del aire local respecto al nivel del mar se traduce en coeficientes de convección de apenas 2,6 a 3,0 W/m²K, sustancialmente inferiores a los reportados en climas húmedos (Cardemil et al., 2020). El Carbonato de Calcio, evaluado los días 14 y 15 de mayo, alcanzó una temperatura mínima de -8,84 °C y un diferencial máximo de 19,29 °C (Tabla 4). Durante las horas de máxima insolación, el aire interno de la cámara superó los 55 °C, mientras que la placa se mantuvo consistentemente por debajo de esa temperatura, confirmando que el enfriamiento radiativo permanece activo incluso bajo radiación solar directa.

Tabla 4.*Matriz comparativa de resultados experimentales reales en Vino Tinto*

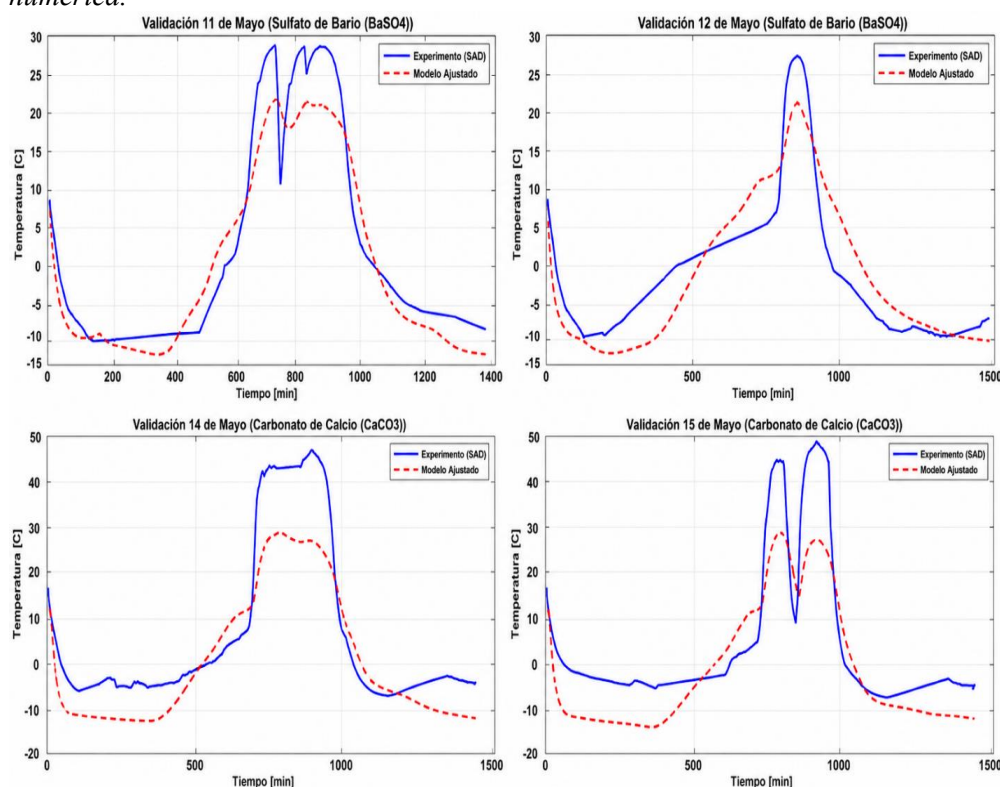
Fecha	Material	T _{placa mín.} (°C)	T _{amb} (°C)	ΔT sub-ambiente (°C)	Presión (hPa)
11-may	Sulfato de Bario	-10,45	14,61	25,06	731,52
12-may	Sulfato de Bario	-10,13	8,12	18,25	732,95
14-may	Carbonato de Calcio	-7,51	3,32	10,83	730,45
15-may	Carbonato de Calcio	-8,84	10,45	19,29	730,75

Nota. Elaboración propia, basada en registros del sistema de adquisición de datos (SAD).

El contraste entre las curvas simuladas y los datos experimentales (Figura 3) evidenció una alta correlación de fase, particularmente en el régimen nocturno. El ajuste de la absorptividad solar efectiva —de un valor teórico de 0,02 a valores calibrados de 0,09 (BaSO_4) y 0,12 (CaCO_3)— permitió reproducir con mayor fidelidad el comportamiento diurno real del dispositivo. El error cuadrático medio (RMSE) promedio fue de 3,74 °C para el Sulfato de Bario y de 8,30 °C para el Carbonato de Calcio (Tabla 5). Este mayor error del CaCO_3 se explica principalmente por la elevada absorptividad solar efectiva detectada experimentalmente, muy superior al valor teórico asumido en el diseño inicial, lo cual se atribuye a la interacción del aglutinante acrílico con el pigmento y a la rugosidad de la aplicación manual —factores ausentes en las condiciones controladas de laboratorio reportadas por Li et al. (2020)—, en línea con lo señalado por Zhao et al. (2023) sobre la sensibilidad del desempeño óptico de los recubrimientos PDRC frente a la técnica de fabricación.

Figura 3.

Validación del modelo térmico: contraste entre la temperatura experimental medida y la simulación numérica.



Nota. Curvas de temperatura de la placa registradas por el sistema de adquisición de datos (SAD, línea continua azul) frente a la temperatura simulada por el modelo ajustado en MATLAB (línea discontinua roja), para los cuatro ciclos de ensayo: 11 y 12 de mayo (Sulfato de Bario) y 14 y 15 de mayo (Carbonato de Calcio). Elaboración propia, mediante procesamiento en MATLAB.

Tabla 5.*Resultados de validación estadística y métricas de error.*

Fecha de ensayo	Material evaluado	RMSE (°C)	MAE (°C)
11 de mayo	Sulfato de Bario (BaSO_4)	3,48	2,95
12 de mayo	Sulfato de Bario (BaSO_4)	4,01	3,12
14 de mayo	Carbonato de Calcio (CaCO_3)	8,00	6,54
15 de mayo	Carbonato de Calcio (CaCO_3)	8,61	7,10

Nota. Elaboración propia, basada en resultados de validación en MATLAB (N = 1.103).

Potencia neta de enfriamiento y análisis comparativo

Al mediodía solar, el balance energético del Sulfato de Bario mostró una potencia radiada de 398,6 W/m², una ganancia atmosférica de 281,4 W/m², una absorción solar de 83,1 W/m² y una ganancia convectiva de 19,8 W/m², resultando en una potencia neta de enfriamiento de 14,3 W/m² incluso bajo irradiancia extrema (Tabla 6). En condiciones nocturnas y de transición, la potencia neta superó los 95 W/m² para el BaSO_4 y los 85 W/m² para el CaCO_3 , validando que la transmitancia de la ventana atmosférica de altura permite superar ampliamente el umbral de 80 W/m² planteado como objetivo de la investigación.

Tabla 6.*Evaluación de la potencia neta de enfriamiento al mediodía solar (BaSO_4)*

Componente del balance	Símbolo	Valor (W/m ²)
Potencia de emisión infrarroja	P_{rad}	398,6
Potencia atmosférica recibida	P_{atm}	281,4
Potencia solar absorbida	P_{sol}	83,1
Potencia de ganancia convectiva	P_{conv}	19,8
Potencia neta de enfriamiento	P_{neto}	14,3

Nota. elaboración propia.

La comparación directa entre materiales (Tabla 7) mostró que el Sulfato de Bario superó al Carbonato de Calcio por un margen de apenas 1,61 °C en la temperatura mínima nocturna. El análisis de varianza de un factor confirmó que esta diferencia es estadísticamente significativa ($F = 99,16$; $p = 2,01 \times 10^{-22}$;



$\alpha = 0,05$), por lo que se rechazó la hipótesis nula de igualdad de medias (Tabla 8). No obstante, esta brecha reducida sugiere una equivalencia funcional nocturna que coincide con lo reportado por Joseph et al. (2023) para clima tropical, y es de particular relevancia práctica: dado que el costo de adquisición del BaSO_4 (320 Bs/kg) es del orden de 32 veces superior al del CaCO_3 de industria nacional (10 Bs/kg), la ganancia térmica marginal del primero no justificaría, en la mayoría de las aplicaciones, su costo adicional. El resultado respalda la recomendación de Aili et al. (2024) de priorizar la integración de materiales accesibles en infraestructuras reales por sobre soluciones ópticamente superiores, pero económicamente inviables a escala.

Tabla 7.

Comparativa de desempeño térmico máximo alcanzado

Parámetro de evaluación	Sulfato de Bario (BaSO_4)	Carbonato de Calcio (CaCO_3)	Diferencia
Temperatura mínima nocturna	-10,45 °C	-8,84 °C	1,61 °C
Máximo delta sub-ambiente	25,06 °C	23,45 °C	1,61 °C
Temperatura máxima diurna	28,00 °C	48,00 °C	20,00 °C
Estabilidad del modelo (RMSE)	3,74 °C	8,30 °C	4,56 °C

Nota. elaboración propia, basada en datos experimentales.

Tabla 8.

Resumen del análisis de varianza (ANOVA) de un factor

Fuente	SC	GI	MC	F	Prob > F
Columnas (material)	10.545,04	1	10.545,04	99,16	$2,01 \times 10^{-22}$
Error	116.759,90	1.098	106,34	-	-
Total	127.305,00	1.099	-	-	-

Nota. elaboración propia, basada en procesamiento estadístico en MATLAB (función anova1).

Proyección de optimización fotovoltaica

Sobre una muestra consolidada de 576 registros sincronizados, un panel fotovoltaico de referencia sin gestión térmica activa operó en Vino Tinto con una eficiencia media de 16,59 %, alcanzando picos de temperatura de celda de 65 °C. La incorporación de la superficie PDRC con Sulfato de Bario elevó la

eficiencia media a 19,35 % (mejora relativa de +16,63 %), manteniendo la celda por debajo de los 45 °C en el pico de radiación; con Carbonato de Calcio, la eficiencia media alcanzó 18,83 % (mejora de +13,50 %), con un pico de 53 °C (Tabla 9 y Figura 4). Este incremento de eficiencia con BaSO₄ es consistente en orden de magnitud con el 30,3 % reportado por Wang et al. (2024) mediante un sistema de redirección activa de radiación reflejada, aunque inferior debido a que el presente estudio empleó un acoplamiento pasivo indirecto —enfriamiento de una superficie posterior— y no una integración óptica directa sobre la celda. La mejora proyectada mediante CaCO₃ refuerza, asimismo, la conclusión de Farooq et al. (2023) sobre la viabilidad técnico-económica de recubrimientos de bajo costo para el ahorro energético en infraestructuras urbanas de gran altitud.

Tabla 9.

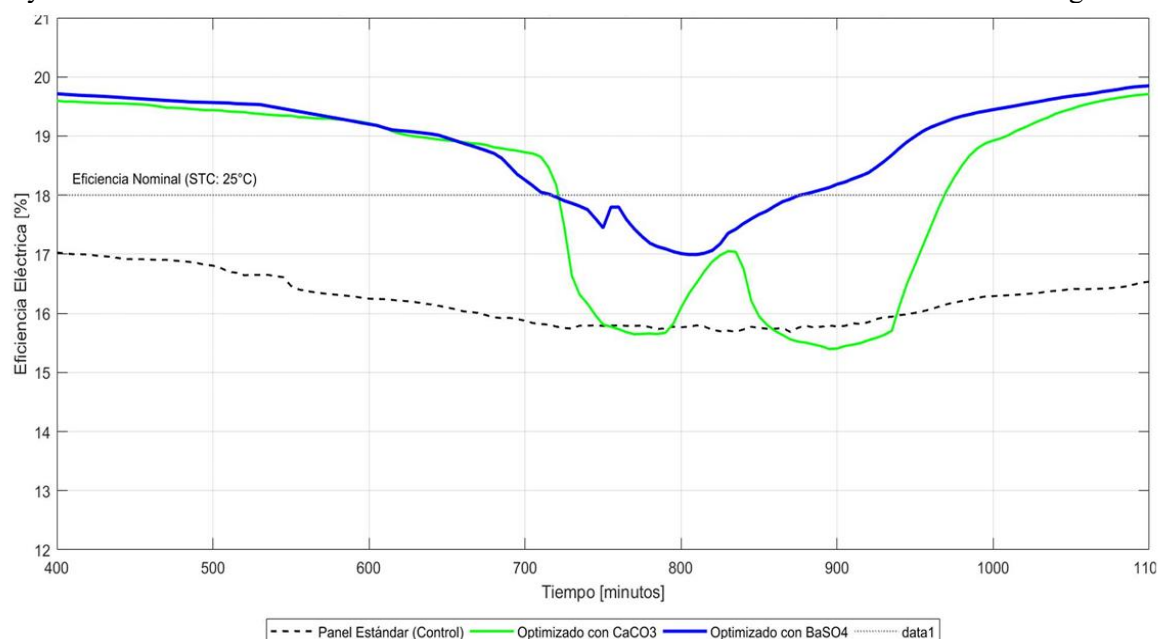
Incremento proyectado en la producción energética diaria según material

Escenario de diseño	Temp. celda	pico Eficiencia media (PV)	Energía diaria (kWh/m ²)	Ganancia neta (%)
Panel estándar (control)	65,0 °C	16,59 %	1,000	Referencia
Panel con CaCO ₃	53,0 °C	18,83 %	1,061	+13,50 %
Panel con BaSO ₄	45,0 °C	19,35 %	1,102	+16,63 %

Nota. Elaboración propia, basada en el modelo de acoplamiento térmico-fotovoltaico y en datos experimentales.

Figura 4.

Proyección del incremento de eficiencia eléctrica en módulos fotovoltaicos mediante tecnología PDRC.



Nota. El gráfico ilustra cómo el enfriamiento radiativo mantiene la eficiencia por encima del nivel de control (panel estándar). Se observa que el BaSO_4 (línea azul) mantiene una estabilidad superior, incluso por encima de la eficiencia nominal del 18%. Por su parte, el CaCO_3 (línea verde), a pesar de la caída diurna por absorción solar al mediodía (minutos 750-900), logra una recuperación rápida y un promedio de eficiencia significativamente mayor al panel sin tratamiento. Elaboración propia, mediante modelo de acoplamiento térmico-fotovoltaico en MATLAB.

Finalmente, es necesario reconocer las limitaciones del estudio: la validación experimental se circunscribió a un prototipo a escala reducida ($0,04 \text{ m}^2$) durante cuatro ciclos circadianos en la estación seca, por lo que la extrapolación a paneles fotovoltaicos comerciales de tamaño real y a otras estaciones del año requiere validación adicional. Asimismo, la ausencia de radiometría espectral de alta resolución en la banda de $8\text{-}13 \mu\text{m}$ obligó a estimar la emisividad del cielo mediante modelos semi-empíricos (Berdahl y Martin), lo cual introduce una fuente de incertidumbre que futuras investigaciones podrían reducir mediante instrumentación especializada.

CONCLUSIONES

La investigación permitió evaluar satisfactoriamente el potencial del enfriamiento radiativo pasivo diurno mediante Sulfato de Bario y Carbonato de Calcio en la ciudad de La Paz, confirmando que las condiciones barométricas de gran altitud (3.865 m.s.n.m.) potencian la viabilidad técnica de esta tecnología. El prototipo experimental alcanzó descensos térmicos sub-ambiente de hasta $25,06 \text{ }^\circ\text{C}$,

superando ampliamente los valores reportados en la literatura internacional para climas tropicales y de nivel del mar, mientras que el modelo determinístico desarrollado en MATLAB logró reproducir el comportamiento térmico del sistema con un error cuadrático medio de 3,48 °C para el material de referencia.

Se demostró que la reducción de la densidad del aire local (0,845 kg/m³, un 28,1 % inferior a la de nivel del mar) disminuye sustancialmente el coeficiente de transferencia de calor por convección, actuando como una resistencia térmica natural que favorece el dominio del mecanismo radiativo sobre el convectivo, con potencias netas de enfriamiento superiores a 95 W/m² en régimen nocturno.

La comparación entre pigmentos evidenció que, si bien el Sulfato de Bario posee una selectividad espectral estadísticamente superior (ANOVA: $F = 99,16$; $p < 0,001$), el Carbonato de Calcio de industria nacional ofrece un rendimiento térmico funcionalmente competitivo, con una brecha de apenas 1,61 °C en el descenso nocturno, a una fracción mínima del costo de adquisición. Esta equivalencia funcional posiciona al CaCO₃ como una alternativa técnica y económicamente viable para la implementación masiva de superficies de enfriamiento pasivo en Bolivia.

En el ámbito de la optimización energética, el modelo de acoplamiento térmico-fotovoltaico demostró que la integración de recubrimientos PDRC permite elevar la eficiencia media de un panel fotovoltaico de silicio monocristalino de 16,59 % a 19,35 % (BaSO₄) y 18,83 % (CaCO₃), representando incrementos de hasta 16,63 % en la producción eléctrica, con el consecuente beneficio en la mitigación del estrés térmico y la extensión de la vida útil de los componentes electromecánicos.

Se recomienda, para futuras investigaciones, escalar la validación experimental a módulos fotovoltaicos comerciales de tamaño real, explorar aglutinantes con mayor transmitancia infrarroja para reducir la absorptividad solar efectiva del CaCO₃, estudiar el impacto del material particulado atmosférico sobre la transparencia del sistema a largo plazo, e implementar sistemas de monitoreo remoto que permitan evaluar la degradación de los materiales bajo exposición prolongada a la radiación ultravioleta del Altiplano. En conjunto, los hallazgos de este estudio sientan una base científica y una herramienta de modelado replicable para el diseño de sistemas de refrigeración pasiva y optimización fotovoltaica en regiones de gran altitud.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aili, A., Jiang, T., Chen, J., et al. (2024). Passive daytime radiative cooling: Moving beyond materials towards real-world applications. *Nexus Energy*, 1(100121). <https://doi.org/10.1016/j.nxener.2024.100121>
- Bijarniya, J. P., Sarkar, J., & Maiti, P. (2020). Environmental effect on the performance of passive daytime photonic radiative cooling and building energy-saving potential. *Journal of Cleaner Production*, 274, 123114. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123114>
- Cardemil, J. M., Tarifeño-Saldivia, A., et al. (2020). Evaluation of the radiative cooling potential in the Atacama Desert. *Universidad Técnica Federico Santa María*.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes* (4a ed.). John Wiley & Sons.
- Evans, D. L., & Florschuetz, L. W. (1977). Cost-performance objectives for terrestrial photovoltaic devices. *Solar Energy*, 19(3), 255-262.
- Farooq, A. S., et al. (2023). Techno-economic analysis on prospects and implementation of employing radiative cooling technology across broader atmospheric conditions. *Energy for Sustainable Development*.
- Hossain, M., & Gu, M. (2016). Radiative cooling: Principles, progress, and potentials. *Advanced Science*, 3(7).
- Huang, M., Wang, Z., et al. (2024). Integrated system of radiative cooling and solar photovoltaics: Performance analysis and life-cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*.
- Joseph, W. R., Tan, J. Y., Koyande, A. K., et al. (2023). Subambient passive radiative cooling effects of barium sulfate and calcium carbonate paints under tropical climate. *University of Nottingham Malaysia*.
- Lee, M., Kim, G., Jung, Y., et al. (2023). Photonic structures in radiative cooling [Revisión técnica].
- Li, X., Peoples, J., Huang, Z., et al. (2020). Full daytime sub-ambient radiative cooling in commercial-like paints with high figure of merit. *Cell Reports Physical Science*, 1(10), 100221.
- Lu, X., Xu, P., Wang, H., et al. (2021). Cooling potential and applications prospects of passive radiative cooling in buildings: The current state-of-the-art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.



- Mandal, J., Fu, Y., Overvig, A. C., et al. (2018). Hierarchically porous polymer coatings for highly efficient passive daytime radiative cooling. *Science*, 362(6412), 315-319. <https://doi.org/10.1126/science.aat9513>
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments* (9a ed.). John Wiley & Sons.
- NASA POWER. (2026). Data Access Viewer: Climatological data for Vinto Tinto, La Paz, Bolivia. National Aeronautics and Space Administration. <https://power.larc.nasa.gov/>
- PI Berlin. (2019). Condiciones operativas de sistemas fotovoltaicos en el Altiplano boliviano: Recomendaciones para pruebas de degradación. Informe técnico para GIZ.
- The MathWorks Inc. (2024). MATLAB and Statistics Toolbox Release 2024a. Natick, Massachusetts, Estados Unidos.
- TuTiempo.net. (2026). Pronóstico y registro de radiación solar horaria para la ciudad de La Paz - mayo 2026. <https://www.tutiempo.net/>
- Wang, Z., Cao, S., et al. (2024). Investigation on a novel integrated system of radiative cooling and solar photovoltaics for high altitude regions. *Solar Energy*, 270.
- Zhao, X., et al. (2023). A solution-processed radiative cooling glass with environmental stability. *Science*, 306. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.adi2224>