

► Pavimentos de mezcla asfáltica modificados con TiO₂
y su aporte a la sustentabilidad urbana

TiO₂-Modified Asphalt Mixtures and their
Contribution to Urban Sustainability

Pablo Cabrera^{1,2}, Eliana Elorza^{1,2}, Ignacio Zapata Ferrero^{1,2}, Gerardo Botasso^{1,2}, Ana M. Castro Luna²

Artículos científicos

Citar: Cabrera, P. et al. (2025) Pavimentos de mezcla asfáltica modificados con tio2 y su aporte a la sustentabilidad urbana. *Teks del Sud*, 6, pp. 21-34

Resumen

El crecimiento urbano ha incrementado el uso de pavimentos asfálticos, los cuales contribuyen a la formación de islas de calor urbanas debido a su bajo albedo. Este estudio evalúa mezclas asfálticas modificadas con dióxido de titanio (TiO₂) para mejorar la sostenibilidad urbana. Se utilizó una mezcla tipo MAC F10 con un 2% de TiO₂ incorporado por vía seca, comparándola con una convencional. Las propiedades opto-térmicas (albedo y emisividad) se midieron experimentalmente, y el comportamiento térmico se simuló con el software PLM-Term bajo condiciones climáticas históricas de las ciudades de La Plata y Salta (Argentina). Los resultados demostraron que la mezcla con TiO₂ presentó un mayor albedo (0,17 frente a 0,10) y una mayor emisividad (0,97 frente a 0,91), lo que resultó en una reducción significativa de la energía total transferida al entorno. Se concluye que la incorporación de TiO₂ constituye una tecnología efectiva para mitigar las ICU, reducir el consumo energético en refrigeración y contribuir a la sostenibilidad ambiental.

Palabras clave: pavimentos fríos, tio2, isla de calor urbana, sustentabilidad urbana.

¹ Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Plata (UTN FRLP), Centro de Investigaciones Viales (LEMaC) La Plata, Buenos Aires, Argentina.
e-mail: pcabrera@frlp.utn.edu.ar; eelorzaperez@alu.frlp.utn.edu.ar; izapata@frlp.utn.edu.ar; gbotasso@frlp.utn.edu.ar

² Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC PBA), La Plata, Argentina.
e-mail: acastro@frlp.utn.edu.ar

Abstract

Urban growth has increased the use of asphalt pavements, which contribute to the formation of urban heat islands (UHI) due to their low albedo. This study evaluates asphalt mixtures modified with titanium dioxide (TiO₂) to improve urban sustainability. A MAC F10 type mixture with 2% TiO₂ incorporated using the dry process was used and compared to a conventional one. The opto-thermal properties (albedo and emissivity) were measured experimentally and the thermal behavior was simulated using PLM-Term software under historical weather conditions from the cities of La Plata and Salta (Argentina). The results showed that the mixture with TiO₂ had a higher albedo (0,17 compared to 0,10) and a higher emissivity (0,97 compared to 0,91), which resulted in a significant reduction in the total energy transferred to the environment. It is concluded that the incorporation of TiO₂ constitutes an effective technology to mitigate UHIs, reduces energy consumption for cooling and contributes to environmental sustainability.

Keywords: cold pavements, tio₂, urban heat island, urban sustainability.

Introducción

La acelerada urbanización del planeta representa uno de los principales desafíos para la sostenibilidad ambiental del siglo XXI. Se estima que para 2050, cerca del 70% de la población mundial residirá en ciudades, ejerciendo una presión sin precedentes sobre la infraestructura urbana (Akbari *et al.*, 2015). Este crecimiento ha llevado a la sustitución generalizada de superficies naturales por pavimentos impermeables, predominantemente asfálticos, los cuales exhiben propiedades opto-térmicas inadecuadas que exacerbán el consumo energético y alteran el balance térmico local (Santamouris, 2013).

Un efecto crítico de esta transformación es la formación de Islas de Calor Urbanas (ICU), fenómeno por el cual las áreas metropolitanas experimentan temperaturas significativamente más altas que sus entornos periurbanos. Los pavimentos asfálticos convencionales, de color oscuro y bajo albedo (valores típicos entre 0,05 y 0,10), son contribuyentes clave a este problema. Pueden alcanzar temperaturas superficiales próximas a los 70 °C (L. Xu *et al.*, 2021), absorbiendo y almacenando calor durante el día para liberarlo gradualmente durante la noche, lo que prolonga la incomodidad térmica y aumenta la demanda de energía para refrigeración (Asaeda *et al.*, 1996). Además, la naturaleza viscoelástica del asfalto hace que su resistencia mecánica se degrade a altas temperaturas, acelerando fenómenos de deformación permanente y envejecimiento, lo que reduce su vida útil (Fernández-Gómez *et al.*, 2013).

Para contrarrestar estos efectos, una estrategia de mitigación prometedora es el desarrollo de “pavimentos fríos”, diseñados para reflejar una mayor fracción de la radiación solar. Entre las diversas técnicas exploradas, la incorporación de pigmentos de alto albedo, como el dióxido de titanio (TiO₂) en las mezclas asfálticas ha demostrado un potencial significativo para reducir la temperatura superficial (Chen *et al.*, 2019; Zhong, 2021). Estudios previos indican que el TiO₂ no sólo puede aumentar la reflectancia solar del pavimento, sino que también actúa como estabilizante, mitigando el envejecimiento foto-oxidativo del ligante asfáltico inducido por la radiación ultravioleta (UV) (Ayar *et al.*, 2024; Zeng *et al.*, 2018).

Más allá del beneficio local inmediato de mejorar el confort térmico urbano y reducir el consumo energético, el aumento del albedo en las superficies pavimentadas tiene implicaciones profundas para la mitigación del cambio climático. Investigaciones recientes cuantifican que incrementar el albedo de las superficies urbanas en 0,01 puede equivaler a una reducción de emisiones de CO₂ equivalente de entre 0,8 a 1,6 kgCO_{2eq}/m² si se consideran las superficies pavimentadas e incluyendo el sombreado urbano y los aerosoles (X. Xu *et al.*, 2020), al disminuir la necesidad de refrigeración mecánica y alterar el balance radiativo local (Sanjuán *et al.*, 2021). Por lo tanto, optimizar las propiedades reflectantes de los pavimentos se erige como una estrategia de sostenibilidad con un doble beneficio: adaptación al cambio climático a escala local y contribución a su mitigación a escala global.

En este marco, el presente estudio evalúa la utilización de una mezcla asfáltica tipo MAC Frio (DNV, 2017), modificada con un 2% de micropartículas de TiO₂ incorporadas por vía seca en lugares con clima templado-húmedo como La Plata, y cálido-seco como Salta. La evaluación se realizó utilizando el software de simulación PLM-Term, desarrollado por el LEMaC (Centro de Investigaciones Viales de la UTN FRLP – CIC PBA). Esta herramienta permitió modelar y cuantificar parámetros clave como la temperatura superficial del pavimento, el flujo de calor sensible y la radiación de onda larga emitida hacia el entorno, bajo condiciones representativas de un espacio urbano sin cobertura vegetal. Los resultados obtenidos muestran que utilizar este tipo de pavimento modificado, con mayor albedo, disminuye las emisiones de calor sensible y de onda larga hacia el entorno urbano.

Metodología

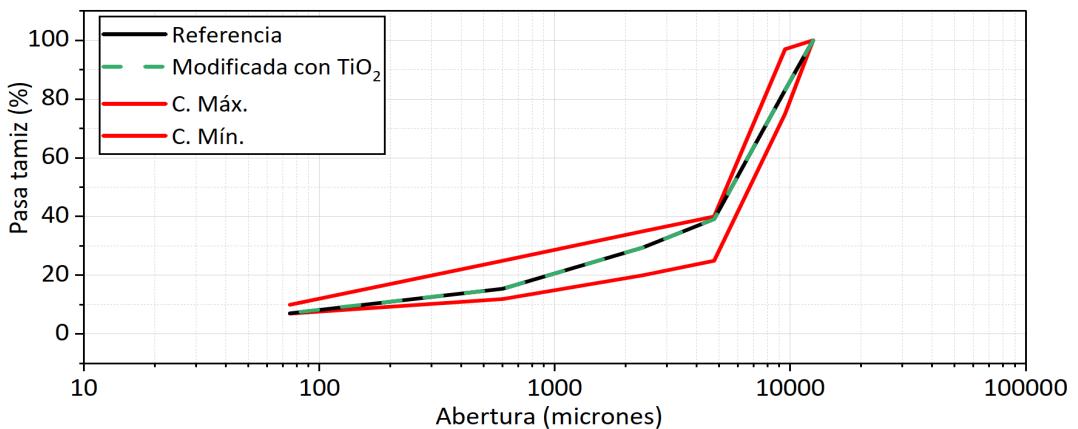
Pavimento asfáltico utilizado

Para la realización de este estudio se empleó como referencia una mezcla asfáltica del tipo microaglomerado en caliente con agregado de tamaño máximo nominal de 12 mm (MAC Frio), designada según el Pliego de Especificaciones Técnicas Generales de Vialidad Nacional (DNV). La dosificación de la mezcla se llevó a cabo en el LEMaC, ajustándose a las directrices del DNV y su esqueleto granular, cuyos límites se encuentran

dentro de los parámetros admisibles, se presenta en la Figura 1. Como ligante se utilizó asfalto modificado con polímeros (tipo AM-3) en un porcentaje del 5% sobre el peso total de la mezcla. La composición final de esta mezcla de referencia se detalla en la Tabla 1.

Sobre esta formulación base se incorporó un 2% de TiO₂ en peso, sustituyendo una parte del contenido de cal. Adicionalmente, el porcentaje de asfalto modificado se ajustó al 4,8%. La Tabla 1 incluye asimismo la dosificación de esta variante modificada, mientras que la Figura 1 muestra el esqueleto granular, común para ambas mezclas.

Figura 1.
Esqueletos
granulares de la
mezcla asfáltica
de referencia y
modificada con
2% de TiO₂.



Materiales	Referencia	Modificada con 2% de TiO ₂
	Contenido (%)	Contenido (%)
Piedra granítica triturada 6-12	57,0	57,1
Arena de trituración 0-6	35,0	35,1
Pigmento TiO ₂	0,0	2,0
Cal	3,0	1,0
Asfalto modificado AM-3	5,0	4,8
TOTAL	100,0	100,0

Medición de propiedades opto-térmicas

El valor de albedo de cada muestra de mezcla asfáltica resultante se evaluó según la norma ASTM E1918 (ASTM, 2006), modificada por (Akbari *et al.*, 2008), en un día despejado de abril de 2024 y abril de 2025 en un área adyacente al estacionamiento.

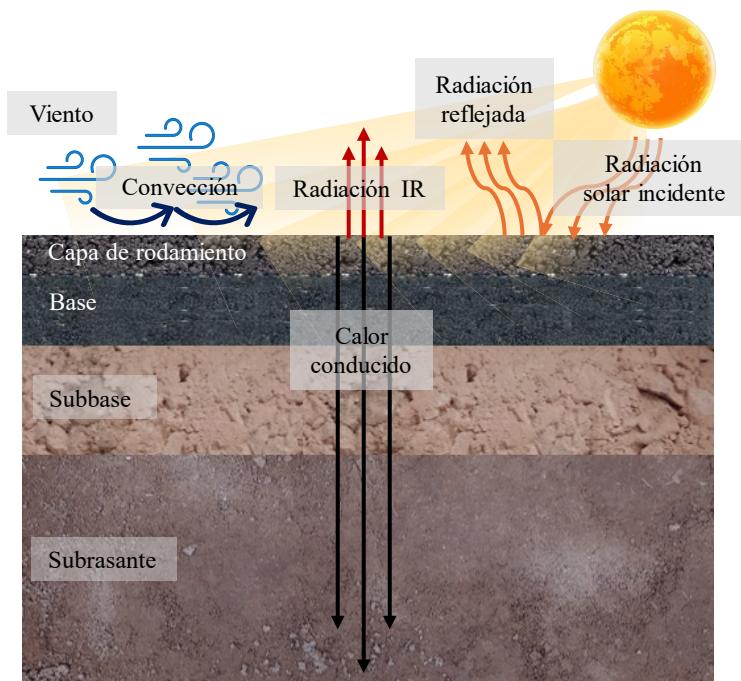
to de la Facultad Regional de la Universidad Tecnológica Nacional de La Plata. La instrumentación utilizada fue un piranómetro marca Kipp&Zonen CMP-3 (sensibilidad: $25,7 \mu\text{V.m}^2/\text{W}$; incertidumbre: $0,67 \mu\text{V.m}^2/\text{W}$) asociado a un datalogger Campbell Scientific CR300. El albedo de cada espécimen se midió mediante seis repeticiones experimentales, con una desviación estándar de $\pm 0,3\%$.

Para determinar la emisividad (ϵ) de cada espécimen, se utilizó una cámara termográfica Testo 865 con una resolución infrarroja de 320×240 píxeles y una visualización de diferencia de temperatura de $\pm 0,1^\circ\text{C}$, de acuerdo con la norma (ASTM, 2014).

Las temperaturas superficiales de los espécimen expuestos al sol, necesarias para validar la simulación que se llevará a cabo, se registraron utilizando termopares tipo K conectados a dataloggers. Los valores se tomaron durante cuatro días en abril de 2024 y abril de 2025.

Principios físicos utilizados por el software PLM-Term

El comportamiento térmico del pavimento se ve afectado conjuntamente por factores propios del material, como los parámetros opto-térmicos, y factores externos como el clima local. Los primeros incluyen el albedo y la emisividad de la capa de rodamiento, así como la conductividad térmica, densidad y capacidad calorífica de todas las capas del paquete estructural, Figura 2.



La transferencia de calor entre el suelo y las capas subyacentes es tratada como una transferencia de calor transitoria unidimensional en un cuerpo semiinfinito que obedece a la Ec. 1:

$$(1) \quad \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho \cdot C_p} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

donde T (K) es el perfil de temperatura del suelo, Cp (J/kg.K) es el calor específico de cada capa, ρ (kg/m³) es la densidad de cada capa, t (s) es el tiempo, z (m) es la coordenada vertical que comienza desde la superficie del pavimento con el positivo hacia abajo, y k (W/m.K) es la conductividad térmica de cada capa.

La variación de temperatura del paquete estructural es impulsada por la radiación solar incidente (I_{sol}) que, dependiendo del albedo (a) que tenga la superficie de la capa de rodamiento, una parte se refleja nuevamente hacia el entorno. El albedo es una propiedad óptica de la superficie del material, cuyos valores van de 0 a 1, e indica qué fracción de la irradiancia solar incidente sobre la superficie del pavimento es reflejada nuevamente hacia el entorno. Si el valor de albedo es igual a cero, el material absorbe el 100% de la irradiancia solar incidente, y si el valor de albedo es igual a uno, el material refleja el 100% de la irradiancia solar incidente. La radiación solar restante se absorbe y se divide en conducción, convección, y radiación infrarroja (IR). El equilibrio de energía en la superficie del suelo obedece a la Ec. 2 (Qin & Hiller, 2014) :

$$(2) \quad I_{sol} \cdot (1 - a) = -k \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} + h_c \cdot (T_s - T_{aire}) + \epsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_{cielo}^4)$$

donde el término a la izquierda del igual representa la irradiación solar absorbida (W/m²), el primer término de la derecha representa el calor conducido en sentido vertical a través de las distintas capas (W/m²), el segundo término representa el término convectivo (W/m²), siendo h_c (W/(m².K)) el coeficiente convectivo que se calcula según la Ec. 3 y T_s (K) la temperatura superficial de la capa de rodamiento:

$$(3) \quad h_c = \begin{cases} 5,6+4 \cdot v & v < 5 \\ 7,2 \cdot v^{0,78} & v \geq 5 \end{cases}$$

donde v (m/s) es la velocidad del viento.

El tercer término de la Ec. 2 es la radiación IR neta (W/m²), donde ε es la emisividad superficial de la capa de rodamiento, σ es la constante de Stefan-Boltzmann cuyo valor es de $5,67 \times 10^{-8}$ (W/(m².K⁴)), y T_{cielo} es la temperatura del cielo calculada según la Ec. 4. La emi-

sividad superficial es un parámetro del material, con valores de 0 a 1, que indica cuánto se asemeja el comportamiento de un cuerpo caliente al comportamiento de un cuerpo negro, siendo un cuerpo negro un objeto teórico que absorbe toda la radiación electromagnética que incide sobre sí y, al mismo tiempo, un emisor perfecto de radiación térmica. La temperatura del cielo es la temperatura promedio derivada de la superficie del suelo en estudio y la temperatura en la tropósfera superior, donde el contenido de vapor de agua es mínimo.

$$(4) \quad T_{\text{sky}} = \epsilon_{\text{sky}}^{0,25} \cdot T_{\text{aire}}$$

donde la emisividad del cielo (ϵ_{sky}) se calcula según la Ec. 5:

$$(5) \quad \epsilon_{\text{sky}} = 0,754 + 0,0044 \cdot T_{\text{ocio}}$$

donde T_{ocio} (°C) se calcula según la Ec. 6:

$$(6) \quad T_{\text{ocio}} = \frac{b_0 \cdot \gamma}{(a_0 - \gamma)}$$

donde $a_0 = 17,3$, $b_0 = 237,7$ y $\gamma = a_0 \cdot T_{\text{aire}} / (b_0 + T_{\text{aire}}) + \ln(H/100)$, siendo H la humedad ambiente, y T_{aire} está en °C.

Método de validación de los datos simulados con el software PML-Term

La validación del modelo de simulación térmica se realizó comparando resultados de temperatura superficial simulados utilizando datos climáticos de la zona de la UTN FRLP, con datos experimentales de temperatura superficial medidos in situ durante un período de cuatro días consecutivos. Las mediciones se efectuaron sobre una muestra asfáltica compacada, cuyas propiedades ópticas críticas se determinaron experimentalmente:

- Albedo superficial: 0,05 (medido con piranómetro Kipp & Zonen CMP3).
- Emisividad superficial: 0,91 (medida con cámara termográfica Testo 865 y termocuplas tipo K). La densidad de la mezcla se cuantificó en laboratorio, obteniendo un valor de 2322 kg/m³. Los parámetros termofísicos restantes se adoptaron de literatura técnica especializada (Correa et al., 2003):

Capas	Espesor (m)	k (W/m.K)	P (kg/m3)	Cp (J/kg.K)
1	0,05	1	2322	920
2	0,10	0,032	26	1100

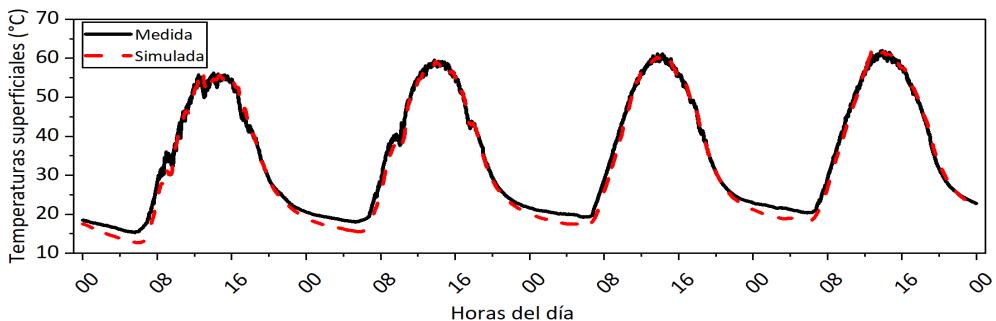
Tabla 3.
 Configuración de
 sistema multicapa.

Resultados

Validación de los datos obtenidos con el software PLM-Term

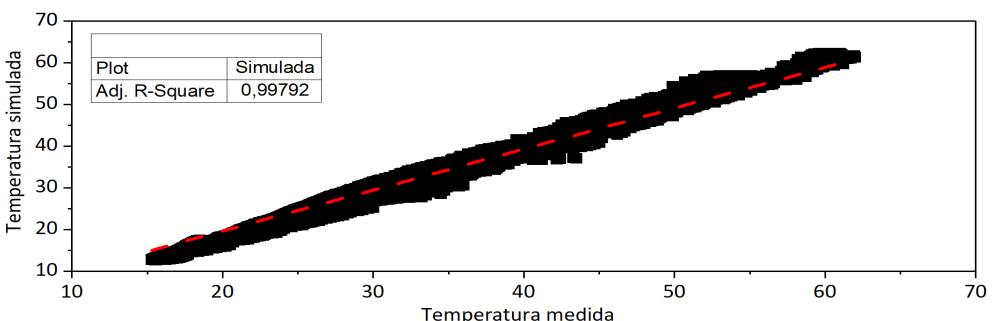
La Figura 3 presenta la comparación temporal de las temperaturas simuladas y medidas a lo largo del ciclo diario completo. Se observa una correspondencia casi perfecta entre ambas series de datos en todos los períodos evaluados, capturando el modelo con alta fielidad la dinámica del proceso térmico, incluyendo la magnitud de los máximos térmicos y la evolución de las transiciones. Los patrones de calentamiento y enfriamiento muestran una sincronización destacable, evidenciando la capacidad del simulador para reproducir la respuesta térmica real del sistema bajo las condiciones de contorno definidas.

Figura 3.
Comparación entre temperaturas superficiales registradas (línea continua negra) y temperaturas superficiales simuladas (línea discontinua roja) durante cuatro días del mes de enero de 2025.



Para una evaluación cuantitativa, la Figura 4 muestra el diagrama de dispersión de los valores medidos (eje horizontal) frente a los simulados (eje vertical), incluyendo la línea de igualdad 1:1 (45°) como referencia teórica. El análisis de regresión lineal forzado al origen (0,0) arrojó un coeficiente de determinación excepcional ($R^2 = 0,99792$), confirmando numéricamente la robustez y precisión global del modelo.

Figura 4.
Correlación entre valores de temperatura superficial simulados y valores de temperatura superficial registrados en campo.

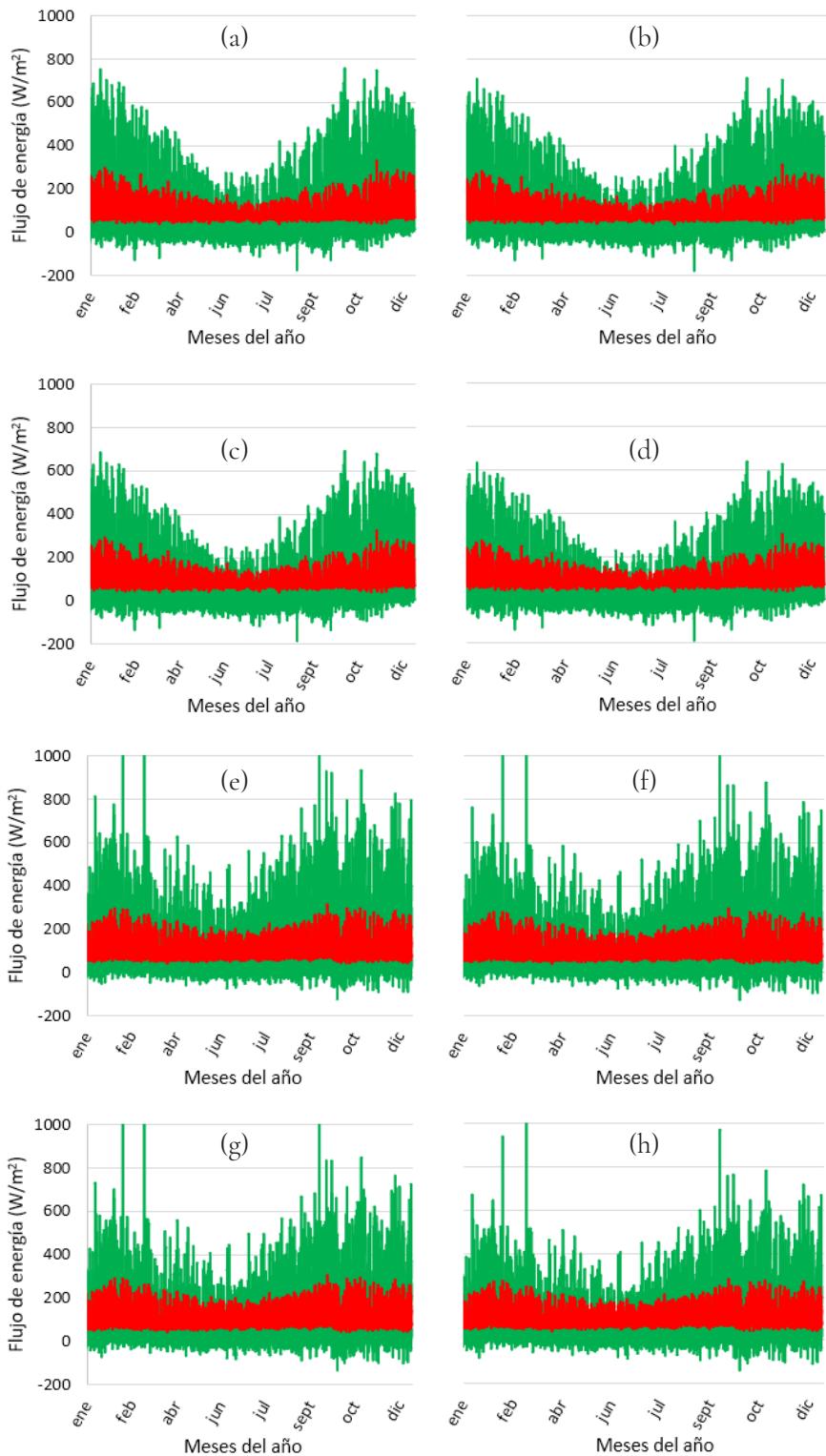


Valores anuales de temperatura superficial en Salta y La Plata

En la Figura 5 se presentan los valores de calor sensible y radiativo emitidos por pavimentos asfálticos en diferentes condiciones durante un año completo, para ello se utilizaron datos climáticos históricos. En primer lugar, se muestran los pavimentos nuevos en La Plata (a) y en Salta (e), con un albedo inicial de 0,05. A continuación, se incluyen los resultados correspondientes a pavimentos envejecidos en La Plata (b) y en Salta (f), cuyo albedo aumenta a 0,10. Por otra parte, se exponen los valores registrados en pavimentos modificados con 2% de TiO₂, recién colocados en La Plata (c) y en Salta (g), y, posteriormente, los de los mismos pavimentos tras el envejecimiento, con un albedo de 0,17. El envejecimiento considerado corresponde al proceso natural de exposición de los pavimentos a las condiciones climáticas. Cabe destacar que estudios previos han demostrado que la incorporación de TiO₂ en la mezcla asfáltica retrasa los procesos de envejecimiento inducidos por radiación UV (Cabrera et al., 2025). Finalmente, un resumen anual de los valores mostrados en la Figura 5 se presenta en la Tabla 4.

A partir del estudio realizado con archivos climáticos históricos de las ciudades de Salta y La Plata, se observa que la modificación de un pavimento de mezcla asfáltica convencional mediante la incorporación de un 2% de TiO₂ contribuye a reducir la energía transferida al entorno y a mejorar el enfriamiento radiativo. Esto se debe a la mayor emisividad alcanzada por la mezcla modificada (0,97), en comparación con la mezcla convencional (0,91). Asimismo, se destaca que la energía transferida hacia el entorno por los pavimentos en la ciudad de Salta resulta superior a la registrada en La Plata, lo que resalta la importancia de considerar, entre las estrategias de mitigación del efecto isla de calor urbano, la implementación de pavimentos fríos como el analizado en este estudio.

Figura 5.
Flujos de energía sensible (verde) y de onda larga (rojo) emitidos por pavimentos asfálticos de referencia recién colocados y luego de 1 año de exposición a la intemperie en La Plata (a, b) y por pavimentos asfálticos modificados con 2 % de TiO₂ recién elaborados y luego de 1 año de exposición en La Plata (c, d). En tanto, las figuras (e, f) y (g, h) corresponden a los mismos pavimentos en la ciudad de Salta.



La Plata			
Tipo de pavimento	Radiación IR anual	Calor sensible anual	Calor total transferido al entorno
	Wh/m ²	Wh/m ²	Wh/m ²
Referencia	850446,10	859129,96	1709576,06
Referencia envejecido	830261,60	789655,88	1619917,48
Modificado	867794,69	734683,17	1602477,86
Modificado envejecido	842637,92	652237,57	1494875,49
Salta			
Tipo de pavimento	Radiación IR anual	Calor sensible anual	Calor total transferido al entorno
	Wh/m ²	Wh/m ²	Wh/m ²
Referencia	914748,19	868461,37	1783209,56
Referencia envejecido	889421,57	800221,71	1689643,28
Modificado	825718,97	745790,53	1671509,50
Modificado envejecido	894264,39	664951,45	1559215,84

Tabla 4.
 Energía acumulada
 transferida desde
 los pavimentos
 hacia el entorno .

Conclusiones

Del análisis realizado en el presente trabajo se destacan las siguientes conclusiones:

- La incorporación de un 2% de TiO₂ en mezclas asfálticas tipo MAC F10 incrementa significativamente el albedo superficial, tanto en estado inicial como después del envejecimiento, reduciendo la absorción de radiación solar y, consecuentemente, la temperatura superficial del pavimento.
- Las simulaciones termo-ópticas realizadas con el software PLM-Term, validadas experimentalmente, confirmaron que los pavimentos modificados transfieren anualmente menos energía al entorno en forma de calor sensible y radiación infrarroja, tanto en el clima templado-húmedo de La Plata como en el cálido-seco de Salta.
- La reducción en la transferencia total de energía al entorno urbano demuestra el potencial de esta tecnología para mitigar el efecto de isla de calor urbana, lo que se traduce en un mayor confort térmico y una potencial disminución en la demanda energética para refrigeración de edificios.

- La implementación de pavimentos asfálticos modificados con TiO₂ se erige como una estrategia de doble beneficio: adaptación al cambio climático a escala local (reducción de ICU) y contribución a su mitigación a escala global (disminución de emisiones de CO₂eq asociadas al menor uso de aire acondicionado).

Referencias

- Akbari, H., Cartalis, C., Kolokotsa, D., Muscio, A., Pisello, A. L., Rossi, F., Santamouris, M., Synnef, A., Wong, N. H., & Zinzi, M. (2015). LOCAL CLIMATE CHANGE AND URBAN HEAT ISLAND MITIGATION TECHNIQUES – THE STATE OF THE ART. *JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND MANAGEMENT*, 22(1), 1-16. <https://doi.org/10.3846/13923730.2015.1111934>
- 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>
- Asaeda, T., Ca, V. T., & Wake, A. (1996). Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere. *Atmospheric Environment*, 30(3), 413-427. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(94\)00140-5](https://doi.org/10.1016/1352-2310(94)00140-5)
- ASTM. (2006). *Test Method for Measuring Solar Reflectance of Horizontal and Low-Sloped Surfaces in the Field*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E1918-06>
- ASTM. (2014). *Practice for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E1933-14>
- Ayar, P., Ruhi, A., Baibordy, A., Asadi Azadgoleh, M., Mohammadi, M. M., & Abdipour, S. V. (2024). Toward sustainable roads: A critical review on nano-TiO₂ application in asphalt pavement. *Innovative Infrastructure Solutions*, 9(5), 148. <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01450-4>
- Cabrera, P., Botasso, G., & Castro-Luna, A. M. (2025). Contribution of an asphalt pavement modified with TiO₂ to the moderation of the Urban Heat Island (UHI). *DYNA*, 92(237), 80-88. <https://doi.org/10.15446/dyna.v92n237.119489>
- Chen, J., Zhou, Z., Wu, J., Hou, S., & Liu, M. (2019). Field and laboratory measurement of albedo and heat transfer for pavement materials. *Construction and Building Materials*, 202, 46-57. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.028>
- Correa, E. N., Flores Larsen, S., Lesino, G. (2003). ISLA DE CALOR URBANA: EFECTO DE LOS PAVIMENTOS. INFORME DE AVANCE. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 7 (2), 11-25.
- DNV. (2017). *PLIEGO DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS GENERALES PARA MICROAGLOMERADOS ASFÁLTICOS EN CALIENTE Y SEMICALIENTE DEL TIPO f*.

- Fernández-Gómez, W. D., Rondón Quintana, H. A., & Reyes-Lizcano, F. (2013). A review of asphalt and asphalt mixture aging. *Ingeniería e Investigación*, 33(1), 5-12. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v33n1.37659>
- Qin, Y., & Hiller, J. E. (2014). Understanding pavement-surface energy balance and its implications on cool pavement development. *Energy and Buildings*, 85, 389-399. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.076>
- Sanjuán, M. Á., Morales, Á., & Zaragoza, A. (2021). Effect of Precast Concrete Pavement Albedo on the Climate Change Mitigation in Spain. *Sustainability*, 13(20), 11448. <https://doi.org/10.3390/su132011448>
- Santamouris, M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island—A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 224-240. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.047>
- Xu, L., Wang, J., Xiao, F., El-Badawy, S., & Awed, A. (2021). Potential strategies to mitigate the heat island impacts of highway pavement on megacities with considerations of energy uses. *Applied Energy*, 281, 116077. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116077>
- Xu, X., Swei, O., Xu, L., Schlosser, C. A., Gregory, J., & Kirchain, R. (2020). Quantifying Location-Specific Impacts of Pavement Albedo on Radiative Forcing Using an Analytical Approach. *Environmental Science & Technology*, 54(4), 2411-2421. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b04556>
- Zeng, W., Wu, S., Pang, L., Chen, H., Hu, J., Sun, Y., & Chen, Z. (2018). Research on Ultra Violet (UV) aging depth of asphalts. *Construction and Building Materials*, 160, 620-627. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.047>
- Zhong, Y. (2021). Research on Thermal Reflection and Cooling Curing Coating Material of Nano Modified Emulsified Asphalt for Urban Road Pavement. *E3S Web of Conferences*, 261, 02051. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126102051>

