

MITIGACIÓN DE ISLAS DE CALOR URBANAS. ESTUDIO ANUAL DE CAMPO Y LABORATORIO

Pablo Cabrera¹, Gerardo Botasso¹, Ana M. Castro Luna²

¹Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Plata, LEMaC Centro de Investigaciones Viales UTN FRLP – CIC PBA, La Plata, Buenos Aires, Argentina.

²Comisión de Investigaciones Científicas CIC PBA, La Plata, Buenos Aires, Argentina.
e-mail: pcabrera@frlp.utn.edu.ar

RESUMEN: La Isla de Calor Urbana (ICU) describe el calentamiento del aire y las superficies en áreas urbanas respecto a zonas no urbanizadas. Durante el día, el pavimento oscuro absorbe radiación solar, alcanzando altas temperaturas superficiales (especialmente en verano), almacena ese calor y lo libera al aire circundante. Con la incorporación de TiO₂ a la mezcla asfáltica, el pavimento se aclara, reduciendo la absorción de calor solar y disminuyendo tanto su temperatura superficial como la del aire adyacente. Este estudio analiza cambios de color, valores de albedo y temperaturas superficiales en probetas de pavimento con y sin adición de TiO₂, expuestas al aire libre durante doce meses, determinando la energía transferida al entorno y el Potencial de Isla de Calor Urbano (PICU) para evaluar la influencia de ambas mezclas en la ICU. Los resultados muestran que el pavimento con TiO₂ reduce su temperatura superficial respecto al de referencia, tanto al inicio del estudio como tras doce meses de exposición; además, se reduce la energía transferida al entorno debido al TiO₂. Como resultado, el Potencial de Isla de Calor Urbana (PICU) para los pavimentos con TiO₂ es menor en condiciones diurnas.

Palabras Clave: TiO₂, ICU, albedo, envejecimiento UV del asfalto.

INTRODUCCION

Más de la mitad de la población mundial vive en ciudades y se espera que llegue al 68% para 2050. Las ciudades densamente pobladas, requieren viviendas y acceso vial, lo que se logra usando dos materiales fundamentales como son el cemento portland y el asfalto, en edificios, calles y estacionamientos. Para abordar los problemas de tráfico vial, el suelo natural suele sustituirse por superficies impermeables como pavimentos.

Durante el verano, los pavimentos asfálticos que se calientan significativamente por la incidencia de radiación solar, y su color oscuro, alcanzan temperaturas elevadas. Las altas temperaturas superficiales del pavimento explican en parte la isla de calor urbana (ICU), con una temperatura ambiente más alta en la ciudad que en las zonas rurales circundantes. El aumento de temperaturas urbanas agrava el consumo energético para refrigeración, incrementa la demanda eléctrica máxima, intensifica la contaminación, aumenta la huella de carbono y causa problemas de salud. La isla de calor es un ejemplo de modificación climática que sucede cuando la urbanización altera las características de la superficie del terreno y del aire que lo envuelve.

La radiación solar reflejada por una superficie está determinada por su albedo, el cual da cuenta de la relación entre la radiación solar que refleja y la radiación incidente total sobre ella, su valor varía de 0 (absorbedor absoluto) a 1 (reflector absoluto). Los materiales de color claro, con mayor albedo (materiales reflectantes), absorben menos radiación solar y al reflejar más radiación diurna



almacenan menos calor que los materiales oscuros. Se han propuesto numerosas medidas para disminuir la contribución de los pavimentos a la ICU, por ejemplo, recubrir la superficie del pavimento con materiales claros que tienen mayor albedo, utilizar asfaltos sintéticos modificados con pigmentos que reflejan la radiación solar (Martínez et al., 2024), o emplear sistemas mecánicos que extraen calor excedente haciendo circular agua por tubos embebidos en el pavimento, donde el fluido captura el calor almacenado, enfriando la superficie y reduciendo su temperatura (García & Partl, 2014). El recubrimiento con pinturas de alto albedo ha probado ser una tecnología eficaz contra la ICU, de duración temporal reducida. La vegetación es un factor importante para mejorar el entorno urbano. Las áreas verdes pueden mitigar significativamente la ICU si se integran en la planificación urbana (Suárez-Gómez et al., 2024). Un pavimento frío se define como aquel que, en comparación con un pavimento convencional, alcanza valores de temperatura superficial más bajos al exponerse a la misma radiación solar. Si el pavimento se calienta menos, se logra un ahorro energético y se mejora la calidad del microclima urbano (Cabrera et al., 2025).

Cuando un pavimento se expone al aire libre, su color se aclara con el tiempo. El asfalto, que es una mezcla compleja de hidrocarburos, participa en reacciones fotoquímicas inducidas por la componente UV de la radiación solar cuando el pavimento se expone a factores ambientales variables, como radiación solar, temperatura del aire y humedad. Estas reacciones iniciadas por la interacción UV y asfalto generan radicales libres que se propagan, rompiendo cadenas moleculares del asfalto, lo que causa cambios en su color, pérdida de flexibilidad y otros deterioros.

En este trabajo se compara la capacidad de reflejar la radiación solar de probetas de pavimento sin y con modificación por adición de TiO_2 , y se estudia la influencia de la exposición prolongada a la intemperie en la variación del albedo y en la temperatura superficial. Se realizan cálculos de la temperatura del aire sobre ambos tipos de pavimentos, del flujo energía que transfieren a su entorno, y del potencial de generar una isla de calor urbana (PICU).

MATERIALES Y MÉTODOS

Una mezcla asfáltica es un material compuesto por asfalto, agregados pétreos (áridos) y relleno mineral. El asfalto es el aglutinante que une los áridos y el relleno mineral. Una correcta distribución granulométrica de los áridos y la presencia del relleno mineral son clave para lograr una mezcla homogénea con las propiedades mecánicas que satisfacen los requisitos de capacidad de carga y seguridad vial del pavimento.

Se prepararon dos mezclas asfálticas densas representativas con asfalto CA-30. La primera empleó además del asfalto, agregados pétreos comerciales 6:12 (grueso), 0:6 (fino) y rellenos combinados (cal + partículas de los agregados grueso y fino que pasan el tamiz #200). Con esta mezcla se fabricaron las probetas de pavimento de referencia. En la segunda mezcla se sustituyó el relleno combinado por 5% de una cantidad equivalente de micropartículas de pigmento TiO_2 (ASTM C979) manteniendo invariable las cantidades de todos los componentes restantes. Con esta mezcla asfáltica se fabricaron las probetas de pavimento modificadas con TiO_2 .

Los ensayos de laboratorio se realizaron con probetas cilíndricas (Marshall: $\text{Ø}102 \text{ mm} \times 64 \text{ mm}$). Para las experiencias al aire libre, se utilizaron probetas prisma cuadrangulares ($300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$).

Las probetas prisma cuadrangulares se expusieron a la intemperie durante doce meses para analizar el efecto de las condiciones climáticas (radiación UV, lluvia, temperatura, etc.) en las mismas. Adicionalmente, se simuló en el laboratorio el efecto específico de la componente UV de la radiación solar. Para ello, se trataron las probetas Marshall en una cámara equipada con lámparas UV-A, siguiendo la norma ASTM G154. Como radiación solar simulada, se seleccionó la banda UV-A de 360 nm.

El albedo de cada muestra (referencia y modificada) se midió según la norma ASTM E1918A modificada por (Akbari et al., 2008), utilizando un piranómetro Kipp & Zonen CMP-3 conectado a un almacenador de datos Campbell CR300. Para determinar la influencia de la exposición al aire libre en las muestras que se analizan, se midió el albedo al inicio y a los 12 meses del estudio. Las mediciones térmicas y de albedo se realizaron con las probetas situadas en la azotea de la universidad UTN-FRLP.

El comportamiento térmico por incidencia sobre las probetas de la radiación solar directa se evaluó utilizando termocuplas tipo K y data logger Testo. La emisividad (ϵ) se midió siguiendo la norma ASTM E1933-99^a utilizando una cámara termográfica Testo (resolución IR 320×240 píxeles, sensibilidad 0,1°C). Con la cámara termográfica, se obtuvieron también imágenes térmicas, las temperaturas que se muestran en las imágenes coloreadas complementan y acuerdan con los datos obtenidos con las termocuplas.

RESULTADOS

Variación del color de las probetas

En la Figura 1 se muestran imágenes de las probetas al inicio de la exposición al aire libre (a) referencia color negro y (b) modificada con TiO₂ color marrón. Tras 12 meses al aire libre la probeta de referencia (c) es más clara que al inicio y la modificada con TiO₂ (d) modifico su color a gris claro. Es probable que el cambio de color en las probetas se realice con participación de la componente UV de la radiación solar, y los componentes del asfalto descrito previamente como una mezcla compleja de hidrocarburos saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos algunos de ellos coloreados. La probeta más clara es la de pavimento modificado con TiO₂, que es un semiconductor capaz de interactuar con la energía de la radiación UV-A que ayuda a la transición de electrones de la banda de valencia a la de conducción y posibilita la competencia del TiO₂ con los componentes del asfalto por los fotones UV y actuar en la eliminación de contaminantes ambientales (Wang et al., 2022). La imagen de los cortes transversales en las probetas luego de 12 meses muestra que el cambio de color en ambas probetas es solo superficial.

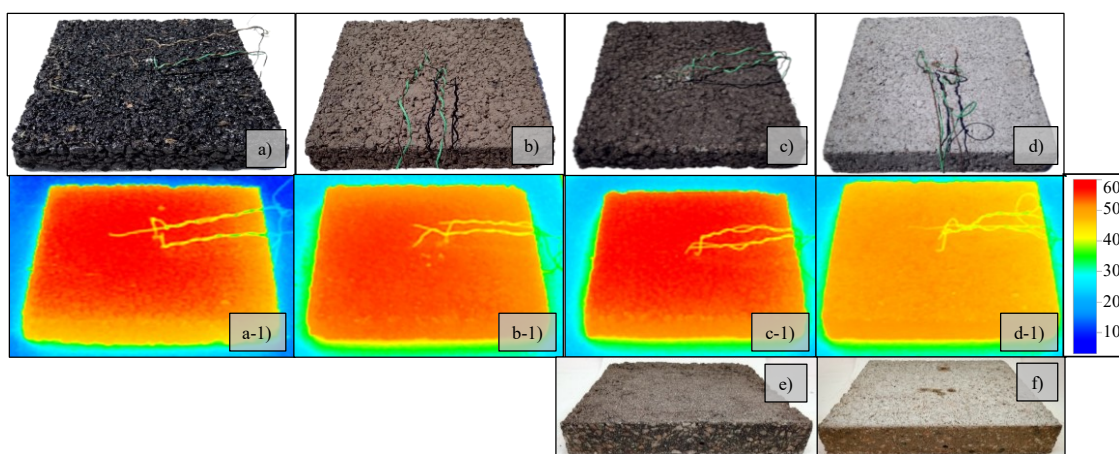


Figura 1: Probetas de pavimento al inicio (a, b) y tras 12 meses de exposición al aire libre (c, d). Arriba: fotografías de las muestras de referencia (a, c) y con TiO₂ (b, d). En medio: imágenes térmicas correspondientes (a-1 a d-1). Abajo: cortes transversales que muestran que el cambio de color es superficial (e: referencia, f: con TiO₂).

Una confirmación de la influencia de la radiación UV sobre el cambio de color en las probetas expuestas al aire libre se realizó en el laboratorio, exponiendo probetas cilíndricas a radiación en la cámara UV. En la Figura 2 se muestra el cambio de color superficial de las probetas luego de

ser expuestas al UV un tiempo equivalente a 8 años de exposición, y un corte longitudinal de las mismas, que confirma que el efecto de la radiación UV sobre las muestras de mezcla asfáltica es solo superficial.

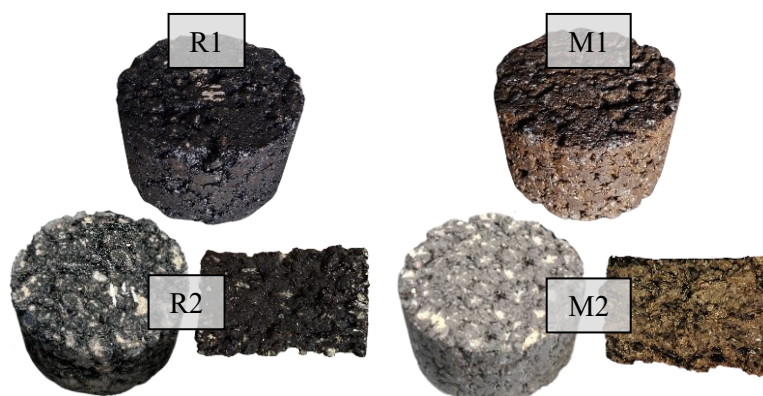


Figura 2: Probetas Marshall de referencia (R) y modificada con TiO_2 (M) antes (1) y después (2) de 8 años exposición en cámara UV.

Valores de albedo determinados al inicio y luego de 12 meses exposición al aire libre

En la Tabla 1 se exhiben los valores del albedo de las muestras de pavimento referencia y modificada con TiO_2 al inicio y luego de 12 meses al aire libre.

Tabla 1 Valores de albedo medidos en los dos tipos de pavimento, al inicio y luego de 12 meses al aire libre.

TIPO DE PAVIMENTO	Albedo Inicio	Albedo A los 12 meses
Pavimento asfáltico de referencia	0,05	0,11
Pavimento asfáltico modificado con TiO_2	0,15	0,26

Al comenzar la exposición al aire libre, el pavimento de referencia tiene un valor de albedo bajo, absorbe el calor solar y su temperatura superficial es más elevada que la del pavimento modificado con TiO_2 , cuyo valor de albedo inicial es mayor. Luego de la exposición a la intemperie por 12 meses, expuestos a variaciones de la radiación solar incidente, la temperatura y humedad, los pavimentos se decoloran, su albedo aumenta y sus temperaturas superficiales son menores. Las muestras de mayor albedo tienen temperatura superficial más baja. Esta afirmación coincide con el cambio de color experimentado por la muestra de pavimento modificado con TiO_2 , que cambió de marrón a gris claro, muestra mayor albedo y su temperatura superficial es más baja.

Variación diaria de la temperatura superficial de probetas de pavimento expuestas al aire libre.

Durante 10 días consecutivos se registraron en las probetas expuestas al aire libre, los valores de temperatura superficial, así como de la intensidad de la radiación solar, temperatura del aire, velocidad del viento y humedad.

Se compara el comportamiento térmico de la probeta de referencia y la modificada con TiO_2 graficando uno de los 10 días consecutivos medidos al inicio y luego de 12 meses de exposición a la intemperie. También se evalúa el calentamiento del aire sobre la superficie del pavimento a 0,5, 1 y 2 metros de altura. Este cálculo se realizó utilizando un modelo numérico que resuelve la ecuación de difusión turbulenta vertical con forzamiento radiativo (Stull, 2003).

La temperatura del aire caliente disminuye con la altura debido a la convección y la expansión del aire ascendente. El aire es más cálido cerca del pavimento, asciende, se enfría al expandirse a mayor altitud y luego es reemplazado por aire más cálido proveniente de abajo. Esto crea un

gradiente de temperatura, con el aire más cálido cerca del pavimento y el aire más frío a mayor altitud.

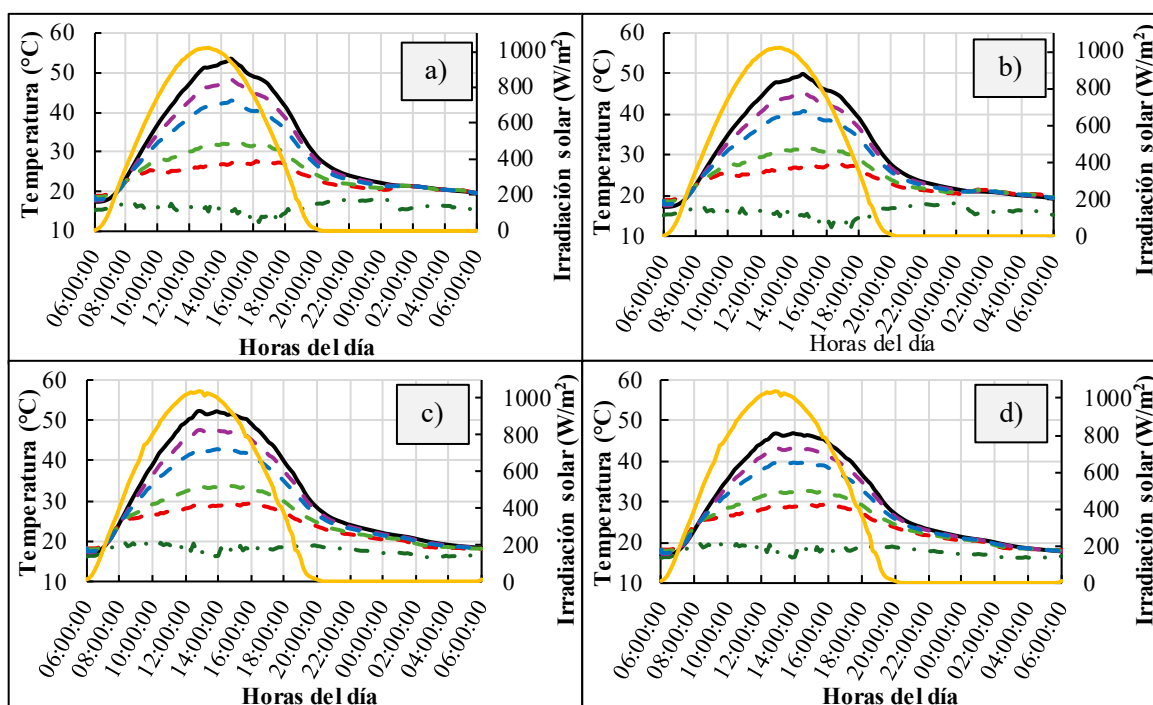


Figura 3: Perfiles diarios de temperatura e irradiación solar para las probetas de referencia (a, c) y con TiO_2 (b, d), medidas al inicio (a, b) y a los 12 meses (c, d). Se muestran la temperatura superficial del pavimento, la del aire a 2,5 m, el punto de rocío y las temperaturas modeladas del aire a diferentes alturas.

En la Figura 3 se muestra la evolución diaria de la irradiación solar (amarillo), temperatura superficial de pavimento (negro, línea sólida), temperatura del aire a 2,5 m (roja; línea discontinua), temperatura de rocío (verde oscuro; línea discontinua), y temperaturas calculadas del aire a: 0,5 m (violeta línea discontinua), 1 m (celeste línea discontinua) y 2 m (verde línea discontinua). Al inicio de la exposición al aire libre y en el cenit solar, la temperatura superficial de la muestra modificada con TiO_2 (b) registró 4°C menos que la de la probeta de referencia (a). Esto indica que el pavimento modificado con TiO_2 absorbió menos calor solar, manteniéndose más frío y emitiendo menos calor al aire ambiente. Tras 12 meses de exposición a la intemperie, esta diferencia se acentuó: el pavimento modificado con TiO_2 (más claro que el de referencia) mostró una temperatura superficial 8°C más baja (c) que la probeta de referencia (d). En la Tabla 2, realizando las diferencias entre la temperatura del aire sobre la probeta de referencia y la temperatura del aire sobre la probeta modificada a distintas alturas sobre las probetas se observa que, la temperatura del aire sobre la probeta modificada es siempre de menor valor que la del aire a la misma altura sobre la probeta de referencia.

Tabla 2: Comparación a diferentes alturas de la temperatura del aire sobre la muestra modificada respecto de la temperatura del aire sobre la muestra de referencia.

Tiempo de exposición	Inicio			Mes 12		
	0,5 m	1 m	2 m	0,5 m	1 m	2 m
Altura del aire sobre superficie						
$\Delta T_{\text{ref-mod}} (^\circ\text{C})$	2.96	2.22	0.74	4.32	3.22	1.02

Cálculo de la transferencia de calor al medioambiente de las muestras estudiadas

Según (Qin & Hiller, 2014), en una superficie de pavimento seco, donde la evaporación es insignificante, la absorción de calor proveniente de la irradiación solar sobre el pavimento (Q_{solarabs}) se expresa como:

$$Q_{\text{solarabs}} = I(\text{abs}) \quad (1)$$

donde I es la irradiación solar incidente (W/m^2) y abs es la absorción del pavimento, la cual se calcula de acuerdo con:

$$\alpha = 1 - \text{albedo} \quad (2)$$

El pavimento absorbe la energía solar incidente y se calienta. El calor absorbido es transferido a todo el volumen del pavimento por conducción aumentando su temperatura.

Un cuerpo caliente emite calor en la región del infrarrojo, IR. Esta transferencia de calor depende del valor de la temperatura superficial y la emisividad del pavimento. Además, si la temperatura superficial del pavimento es mayor que la temperatura del aire sobre él, parte de la energía absorbida será transferida desde el pavimento hacia el aire por convección. Esta transferencia depende del valor de la temperatura superficial de la muestra caliente, de la temperatura del aire circundante, así como de la velocidad del viento sobre la superficie analizada.

La energía transferida desde el pavimento hacia el ambiente circundante será la suma de la energía que el pavimento transfiere por convección y por emisión radiativa, lo que se expresa como:

$$Q_{\text{transferida}} = h_c \cdot (T_s - T_{\text{amb}}) + \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_s^4 - T_c^4) \quad (3)$$

Donde h_c ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) es el coeficiente convectivo que depende de la velocidad del viento según la ecuación (4); T_s (K) es la temperatura superficial del pavimento; T_{amb} es la temperatura del aire registrada (K); σ es la constante de Stefan-Boltzmann cuyo valor es $5,67 \times 10^{-8}$ ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$), ε es la emisividad del pavimento y es adimensional, variando sus valores entre 0 y 1; T_c es la temperatura del cielo, la temperatura promedio que resulta entre aquella del suelo sobre el cual se está trabajando y la temperatura en la parte superior de la tropósfera donde el contenido de vapor de agua es mínimo que se calcula según la ecuación (5).

$$\begin{aligned} h_c &= 7,2 \times v^{0,78} & v \geq 5 \text{ m/s} \\ h_c &= 5,6 + 4 \cdot v & v < 5 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (4)$$

$$T_c = (0,754 + 0,0044 \cdot T_d)^{0,25} \cdot T_{\text{amb}} \quad (5)$$

T_d es la temperatura del punto de rocío ($^{\circ}\text{C}$).

Aplicando las ecuaciones 1 a 5, se calcula la energía que entrega al medio ambiente cada una de las superficies analizadas. En la Figura 4 se muestran los flujos de: irradiancia solar (amarillo), energía solar absorbida (azul), energía transferidos por convección (celeste) y radiación (rojo) desde las muestras de referencia y modificada al inicio de la exposición al aire libre y luego de 12 meses.

Se observa en el período diurno la menor transferencia de calor por convección desde la muestra modificada, tanto al inicio como luego de 12 meses de exposición, lo que está de acuerdo con el incremento del albedo de la muestra modificada con TiO_2 , y las menores temperaturas superficiales registradas.

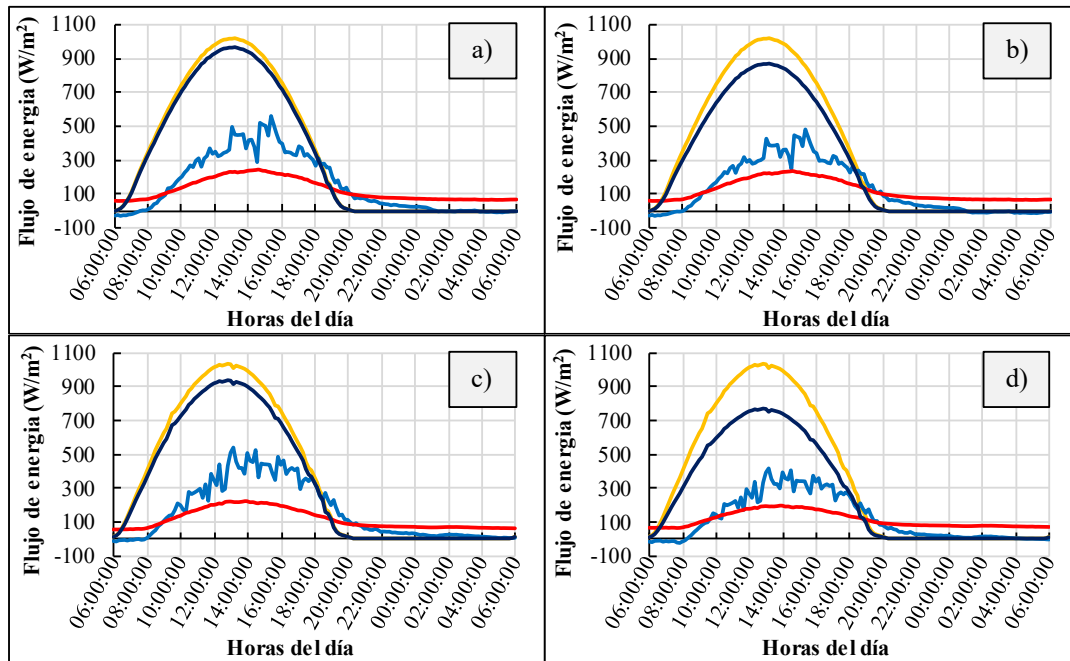


Figura 4: Balance energético diario para las muestras de referencia (a, c) y con TiO_2 (b, d), al inicio (a, b) y a los 12 meses (c, d). Las curvas representan la energía solar absorbida, la irradiancia incidente, el calor transferido por convección y la radiación infrarroja emitida.

En la Tabla 3 se muestran los valores de energía acumulada transferida por convección y radiación IR al ambiente durante los 10 días de medición. Los valores se calculan durante el período de calentamiento de las muestras (6 a 14 hs), de enfriamiento (14 a 20 hs), y durante la noche (20 a 6 h)

Tabla 3: Valores de energía acumulada.

	Muestra referencia		Muestra TiO_2		
	Convección (Wh/m^2)	Radiación IR (Wh/m^2)	Convección (Wh/m^2)	Radiación IR (Wh/m^2)	
Mes 1	13140,72	9634,71	10666,62	9435,22	6 a 14 hs
Mes 12	9993,59	9283,91	6831,91	8529,72	
Mes 1	24441,15	11482,55	20998,97	11083,31	14 a 20 hs
Mes 12	21610,29	11295,90	16764,72	10237,63	
Mes 1	7582,94	8924,85	6190,74	9062,37	20 a 6 hs
Mes 12	7398,61	8891,47	5514,46	8809,61	

De la Tabla 3 se puede concluir que el período de mayor transferencia de calor al ambiente es el que transcurre entre las 14 y las 20 hs. La contribución convectiva es la predominante en ese período. En todos los períodos analizados la transferencia convectiva en la muestra modificada con TiO_2 es menor que en la de referencia. La menor transferencia de calor en el mes 12 se debe a las menores temperaturas superficiales registradas.

Potencial de Isla de Calor Urbana, PICU, cálculo a partir de las temperaturas obtenidas experimentalmente

Los distintos pavimentos presentan temperaturas superficiales variables, determinadas por su composición, propiedades térmicas, color y textura. Sin embargo, todos comparten una característica clave: durante las horas de sol, su temperatura supera a la del aire circundante. Este diferencial térmico genera una transferencia de calor desde el pavimento hacia el aire, calentando

la atmósfera y contribuyendo así a la formación de islas de calor urbanas. Para cuantificar este fenómeno, se define el Potencial de Isla de Calor Urbano (PICU) como un indicador que mide la energía térmica liberada por los pavimentos hacia su entorno en ubicaciones específicas (Yang et al., 2020).

El PICU puede calcularse según la Ec. 1:

$$\text{PICU } (\%)_i = \frac{T_{\text{sup}, i} - T_{\text{aire}, i}}{T_{\text{aire}, i}} \times 100 \quad (6)$$

donde PICU (%) es el Potencial de Isla de Calor en diferentes horas del día, i es el paso horario, $T_{\text{sup}, i}$ es la temperatura superficial en cada paso horario, y $T_{\text{aire}, i}$ es la temperatura del aire ambiente registrada en cada paso horario.

La Figura 5 muestra los valores del Potencial de Isla de Calor Urbano (PICU, %) para las probetas de referencia y modificadas con TiO_2 en distintos horarios. Estos datos, obtenidos de las temperaturas superficiales de la Figura 3 durante un día representativo de los 10 registrados, comparan mediciones iniciales y tras 12 meses de exposición. Como se observa, el PICU alcanza su máxima intensidad durante las horas de sol, especialmente en el cenit solar. En el mes 1 (líneas punteadas), el pico máximo a las 14 h de la muestra con TiO_2 (línea roja) presenta un 13% menos que la referencia. Para el mes 12, esta diferencia aumenta al 20% debido al mayor albedo adquirido por la muestra modificada. Esto indica que tras un año, el pavimento con TiO_2 reduce su contribución a la isla de calor urbana en casi un 40%.

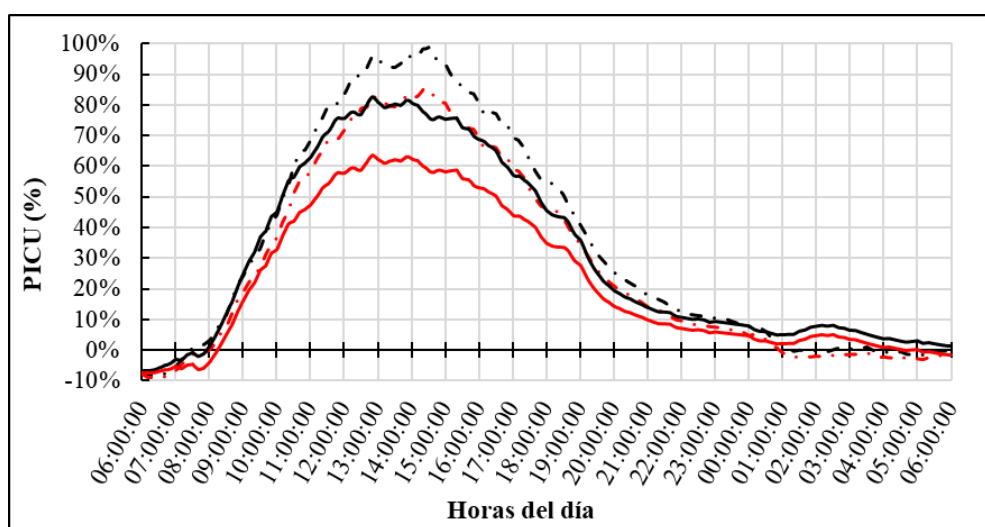


Figura 5: Variación porcentual de PICU a lo largo de un día: línea punteada, mes 1, negra (referencia) y roja (modificada con TiO_2), línea continua, mes 12, negra (referencia) y roja (modificada con TiO_2).

CONCLUSIONES

Se prepararon dos mezclas asfálticas para pavimento: una con asfalto CA-30 áridos y rellenos combinados, muestra de referencia, otra con TiO_2 , una mezcla similar pero sustituye el relleno combinado por polvo micrométrico de TiO_2 , mezcla modificada. Se evaluó el comportamiento térmico de las probetas fabricadas con estas mezclas asfálticas antes y después de la exposición a la intemperie durante 12 meses, así como luego de una exposición prolongada a luz UV en laboratorio.

Las conclusiones más relevantes son:

1. Aumento significativo y sostenido del albedo con TiO₂: La incorporación de TiO₂ en la mezcla asfáltica incrementa el albedo superficial inicial de 0.05 a 0.15 comparado con el valor del pavimento de referencia. Luego de 12 meses de exposición a la intemperie, este efecto se mantiene y amplía: el albedo del pavimento con TiO₂ alcanza un valor de 0.26 (1,4 veces más que el valor del pavimento de referencia envejecido). Esto se atribuye a las propiedades fotocatalíticas del TiO₂, que previenen el oscurecimiento y promueven un aclaramiento superficial.

2. Reducción efectiva de la temperatura superficial: El pavimento con TiO₂ registra temperaturas superficiales consistentemente más bajas que el pavimento de referencia, tanto en el inicio del estudio (nuevo) como después de envejecido. Esta diferencia es particularmente notable durante horas diurnas de alta radiación solar, donde la reflectividad elevada del TiO₂ reduce la absorción de calor, lo que se verifica con las imágenes térmicas de las superficies de cada probeta.

3. Mitigación cuantificable del efecto isla de calor urbana (ICU): El "Potencial de Isla de Calor Urbana" (PICU) calculado para pavimentos con TiO₂ es significativamente menor, especialmente en condiciones diurnas. Tras 12 meses, el PICU del pavimento modificado es hasta un 40% inferior al convencional durante picos de calor. Esto demuestra que el TiO₂ no solo reduce la temperatura superficial, sino que también limita la contribución del pavimento al ICU al disminuir la liberación del calor almacenado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte financiero de UTN-FRLP. PC agradece la beca doctoral otorgada por CONICET.

REFERENCIAS

- Akbari, H., Cartalis, C., Kolokotsa, D., Muscio, A., Pisello, A., Rossi, F., . . . Zinzi, M. (2016). Local climate change and urban heat island mitigation techniques the state of the art. *Journal of Civil Engineering and Management*(22), 1-16. <http://dx.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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2008.01.001>
- Asaeda, T., Vu, C., & Wake, A. (1996). Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere. *Atmospheric Environment*, 3(30), 413-427. [http://dx.doi.org/10.1016/1352-2310\(94\)00140-5](http://dx.doi.org/10.1016/1352-2310(94)00140-5)
- ASTM C979. (1999). Standard Specification for Pigments for Integrally Colored Concrete.
- ASTM E1918. (2006). Standard Test Method for Measuring Solar Reflectance of Horizontal and Low-Sloped Surfaces in the Field.
- ASTM E1933. (2006). Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers.
- ASTM G154. (2016). Standard Practice for Operating Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus for Exposure of Nonmetallic Materials.
- Ayar, P., Ruhi, A., Baibordy, A., Asadi Azadgoleh, M., Mahdi Mohammadi, M., & Abdipour, S. (2024). Toward sustainable roads: a critical review on nano-TiO₂ application in asphalt pavement. *Innovative Infrastructure*, 5(9). <http://dx.doi.org/10.1007/s41062-024-01450-4>
- Cabrera, P., Botasso, G., & Castro Luna, A. (2025). Contribution of an asphalt pavement modified with TiO₂ to the moderation of the Urban Heat Island (UHI). *DYNA*, 237(92), 80-88. <https://dx.doi.org/10.15446/dyna.v92n237.119489>
- García, A., & Partl, M. (2014). How to transform an asphalt concrete pavement into a solar turbine. *Applied Energy*, 119, 431-437. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.006>

- Gong, X., Liu, Q., Lv, Y., Shuaichao, C., Wu, S., & Ying, H. (2023). A systematic review on the strategies of reducing asphalt pavement temperature. *Case Studies in Construction Materials*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01852>
- Gul, B., Naveed, A., Hafiz, M., Tufail, A., & Muhammad, S. (2021). Effect of addition of pigments on thermal characteristics and the resulting performance enhancement of asphalt. *Construction and Building Materials*, 302. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124212>
- Huang, M., & Wen, X. (2019). Experimental Study on Photocatalytic Effect of Nano TiO₂ Epoxy Emulsified Asphalt Mixture. *Applied Sciences*, 9. <http://dx.doi.org/10.3390/app9122464>
- Li, Y., Feng, J., Wu, S., Anqi, C., Kuang, D., Bai, T., . . . Gu, D. (2022). Review of ultraviolet ageing mechanisms and anti-ageing methods for asphalt binders. *Journal of Road Engineering*, 2(2), 137-155. <https://doi.org/10.1016/j.jreng.2022.04.002>
- Martinez, A., López-Montero, T., Miró, R., & Villar, R. (2024). PAVIMENTOS REFLECTANTES PARA REDUCIR EL EFECTO DE LAS ISLAS DE CALOR URBANAS. *Memoria técnica XXII CILA de Granada*, (págs. 1489-1510).
- Omairey, E., Zhang, Y., Al-Malaika, S., Sheena, H., & Gu, F. (2019). Impact of anti-ageing compounds on oxidation ageing kinetics of bitumen by infrared spectroscopy analysis. *Construction and Building Materials*, 223, 755-764. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.021>
- Qin, Y., & Hiller, J. (2014). Understanding pavement-surface energy balance and its implications on cool pavement development. *Energy and Buildings*(85), 389-399. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.076>
- Qin, Y., Hiller, J., & Meng, D. (2019). Linearity between Pavement Thermophysical Properties and Surface Temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 11(31). [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002890](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002890)
- 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.047>
- Sirin, O., Paul, D., & Kassem, E. (2018). State of the Art Study on Aging of Asphalt Mixtures and Use of Antioxidant Additives. *Hindawi Advances in Civil Engineering*, 18. <https://doi.org/10.1155/2018/3428961>
- Stull, R. B. (2012). *An introduction to boundary layer meteorology* (Vol. 13). Springer Science & Business Media.
- Suárez-Gómez, P., Cantón-Ivanissevich, M., & Correa-Cantaloube, É. (2024). Evaluación de estrategias de enverdecimiento vertical en clima árido. El caso de las fachadas verdes. *Revista de Arquitectura*, 26, 75-90. <https://doi.org/10.14718/RevArq.2024.26.5014>
- Wang, X., Li, S., Chen, P., Li, F., Hu, X., & Hua, T. (2022). Photocatalytic and antifouling properties of TiO₂-based photocatalytic membranes. *materials today chemistry*, 23, 100650. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2021.100650>
- 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). <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116077>
- Xu, S., Wang, C., Wang, Y., Yao, Q., Ma, H., Jia, X., & Fang, L. (2023). Evaluation of asphalt ageing degree based on asphalt color. *Engineering Research Express*, 1(5). <https://doi.org/10.1088/2631-8695/acb11f>
- Yang, H., Yang, K., Miao, Y., Wang, L., & Ye, C. (2020). Comparison of Potential Contribution of Typical Pavement Materials to Heat Island Effect. *Sustainability*, 12(11). <http://dx.doi.org/10.3390/su12114752>
- Zeng, W., Wu, S., Mei 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>

URBAN HEAT ISLAND MITIGATION ANNUAL FIELD AND LABORATORY STUDY

ABSTRACT: The Urban Heat Island (UHI) describes the warming of air and surfaces in urban areas relative to non-urbanized areas. During the day, dark pavement absorbs solar radiation, reaching high surface temperatures (especially in summer), stores this heat, and releases it to the surrounding air. With the addition of TiO₂ to the asphalt mixture, the pavement becomes lighter, reducing solar heat absorption and lowering both its surface temperature and that of the surrounding air. This study analyzes color changes, albedo values, and surface temperatures in pavement probes with and without the addition of TiO₂, exposed to the outdoors for twelve months, determining the energy transferred to the environment and the Urban Heat Island Potential (UHIP) to evaluate the influence of both mixtures on the UHI. The results show that the pavement with TiO₂ reduces its surface temperature compared to the reference pavement, both at the beginning of the study and after twelve months of exposure; in addition, the energy transferred to the environment is reduced due to the TiO₂. As a result, the Urban Heat Island Potential (UHI) for TiO₂ pavements is lower under daytime conditions.

Keywords: TiO₂, UHI albedo, UV aging of asphalt.