

Salinas González, D.; Sobrino Rodríguez, J.; Balaguer Beser, Á.; Skokovic Jovanovic, D. Impacto del Cambio Climático en la Temperatura de las Grandes Aglomeraciones Urbanas del Mundo

Impacto del Cambio Climático en la Temperatura de las Grandes Aglomeraciones Urbanas del Mundo

Salinas González, Daniel ¹ Sobrino Rodríguez, José ¹ Balaguer Beser, Ángel ²
Skokovic Jovanovic, Drazen ¹

¹ Universitat de València, España

² Universitat Politècnica de València

ORCID: Salinas González 0000-0002-5109-5391 Sobrino Rodríguez 0000-0003-3787-9373 Balaguer Beser 0000-0003-0039-2641 Skokovic Jovanovic 0000-0001-7103-9138

Correspondencia: daniel.salinas@uv.es jose.sobrino@uv.es abalague@mat.upv.es drazen.skokovic@uv.es

RESUMEN

El cambio climático representa uno de los desafíos más críticos del siglo XXI, manifestándose con severidad en las grandes aglomeraciones urbanas mediante la alteración del balance energético superficial. Este estudio investiga cómo el calentamiento global amplifica las anomalías térmicas en las ciudades, centrándose en la cuantificación y evolución del fenómeno de la Isla de Calor Urbano Superficial (SUHI) a escala global utilizando sensores MODIS (Terra y Aqua). La metodología se basa en la recuperación de la Temperatura de la Superficie Terrestre (LST) mediante el algoritmo UVEG-TES. Este enfoque físico procesa radiancias de Nivel 1B e integra perfiles atmosféricos de reanálisis ERA5 con el modelo RTTOV. La base de datos generada (Nivel 2 UVEG) permite desacoplar la emisividad de la temperatura en entornos complejos, sirviendo de referencia para validar los productos estándar MOD21/MYD21 y garantizando una precisión contrastada con estaciones in situ. El análisis del impacto climático se realiza mediante productos de Nivel 3 (L3) derivados de la serie UVEG. Se aplica una delimitación dinámica de áreas urbanas y rurales (triangulación de Voronoi) para calcular la intensidad del SUHI. Asimismo, se analizan indicadores de degradación térmica como el Urban Thermal Field Variance Index (UTFVI), el Discomfort Index (DI) y la identificación de Hotspots mediante umbrales estadísticos. Los resultados en 56 metrópolis globales evidencian una tendencia creciente en las temperaturas y una intensificación del estrés térmico, vinculando la expansión urbana con la exacerbación del cambio climático local. Finalmente, la consistencia de la serie temporal generada permite no solo estimar la evolución histórica del SUHI, sino también establecer bases robustas para la predicción de futuras olas de calor, proporcionando una herramienta esencial para el diseño de estrategias de adaptación en las aglomeraciones urbanas más vulnerables..



Palabras clave: LST, SUHI, Cambio Climático, Predicción Térmica, TES


Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 18 febrero 2026

Impacto del Cambio Climático en la Temperatura de las Grandes Aglomeraciones Urbanas del Mundo


Salinas González, Daniel ⁽¹⁾, Sobrino Rodríguez, José A ⁽¹⁾, Balaguer Beser, Ángel ⁽²⁾, Skokovic Jovanovic, Drazen ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Universitat de València, España.

 0000-0002-5109-5391, daniel.salinas@uv.es;  0000-0003-3787-9373, sobrino@uv.es

 0000-0001-7103-9138, drazen.skokovic@uv.es

⁽²⁾ Universitat Politècnica de València.

 0000-0003-0039-2641, abalague@mat.upv.es

Resumen: El cambio climático representa uno de los desafíos más críticos del siglo XXI, manifestándose con severidad en las grandes aglomeraciones urbanas mediante la alteración del balance energético superficial. Este estudio investiga cómo el calentamiento global amplifica las anomalías térmicas en las ciudades, centrándose en la cuantificación y evolución del fenómeno de la Isla de Calor Urbano Superficial (SUHI) a escala global utilizando sensores MODIS (*Terra* y *Aqua*). La metodología se basa en la recuperación de la Temperatura de la Superficie Terrestre (LST) mediante el algoritmo UVEG-TES. Este enfoque físico procesa radiancias de Nivel 1B e integra perfiles atmosféricos de reanálisis ERA5 con el modelo RTTOV. La base de datos generada (Nivel 2 UVEG) permite desacoplar la emisividad de la temperatura en entornos complejos, sirviendo de referencia para validar los productos estándar MOD21/MYD21 y garantizando una precisión contrastada con estaciones *in situ*. El análisis del impacto climático se realiza mediante productos de Nivel 3 (L3) derivados de la serie UVEG. Se aplica una delimitación dinámica de áreas urbanas y rurales (triangulación de Voronoi) para calcular la intensidad del SUHI. Asimismo, se analizan indicadores de degradación térmica como el *Urban Thermal Field Variance Index* (UTFVI), el *Discomfort Index* (DI) y la identificación de Hotspots mediante umbrales estadísticos. Los resultados en 56 metrópolis globales evidencian una tendencia creciente en las temperaturas y una intensificación del estrés térmico, vinculando la expansión urbana con la exacerbación del cambio climático local. Finalmente, la consistencia de la serie temporal generada permite no solo estimar la evolución histórica del SUHI, sino también establecer bases robustas para la predicción de futuras olas de calor, proporcionando una herramienta esencial para el diseño de estrategias de adaptación en las aglomeraciones urbanas más vulnerables.

Palabras clave: LST, SUHI, Cambio Climático, Predicción Térmica, TES

Impact of Climate Change on the Temperature of the World's Large Urban Agglomerations

Abstract: Climate change represents one of the most critical challenges of the 21st century, manifesting with particular severity in large urban agglomerations through the alteration of the surface energy balance. This study investigates how global warming amplifies thermal anomalies in cities, focusing on the quantification and evolution of the Surface Urban Heat Island (SUHI) phenomenon on a global scale using MODIS sensors (*Terra* and *Aqua*). The methodology is based on the retrieval of Land Surface Temperature (LST) using the UVEG-TES algorithm. This physical approach processes Level 1B radiances and integrates atmospheric profiles from ERA5 reanalysis with the RTTOV model. The generated database (UVEG Level 2) allows for the decoupling of emissivity and temperature in complex environments, serving as a reference to validate standard MOD21/MYD21 products and ensuring accuracy cross-referenced with *in situ* stations. The analysis of climate impact is conducted using Level 3 (L3) products derived from the UVEG series. A dynamic delimitation of urban and rural areas (via Voronoi triangulation) is applied to calculate SUHI intensity. Furthermore, thermal degradation indicators such as the Urban Thermal Field Variance Index (UTFVI), the Discomfort Index (DI), and the identification of Hotspots through statistical thresholds are analysed. Results across 56 global metropolises evidence a warming trend in surface temperatures and an intensification of thermal stress, linking

urban expansion with the exacerbation of local climate change. Finally, the consistency of the generated time series allows not only for the estimation of the historical evolution of the SUHI but also for the establishment of robust foundations for the prediction of future heatwaves, providing an essential tool for designing adaptation strategies in the most vulnerable urban agglomerations.

Keywords: LST, SUHI, Climate Change, Thermal Prediction, TES.

1. INTRODUCCIÓN

En el marco del calentamiento global, la teledetección térmica ocupa un papel central, ya que la Temperatura de la Superficie Terrestre (LST) es un parámetro esencial del balance energético del sistema Tierra. La recuperación precisa de esta variable requiere un conocimiento detallado de la física de la radiación y la aplicación de algoritmos robustos como el *Split-Window* (SW) y el *Temperature and Emissivity Separation* (TES), validados mediante campañas internacionales de calibración y validación (Gillespie *et al.*, 1998; Sobrino *et al.*, 2008). El avance hacia misiones de alta resolución térmica, como *Copernicus LSTM*, *TRISHNA* y *SBG*, promete ampliar significativamente la capacidad de observación detallada del ciclo energético urbano (Koetz *et al.*, 2018).

Bajo este panorama tecnológico, el estudio de la Isla de Calor Urbano Superficial (SUHI) emerge como un campo de aplicación crítico. Este fenómeno, manifestado como una anomalía térmica positiva entre las áreas urbanas y sus entornos rurales, representa uno de los indicadores más claros del impacto térmico del desarrollo urbano y su interacción con el cambio climático global. La relevancia del SUHI ha aumentado notablemente debido al incremento en la frecuencia e intensidad de las olas de calor, afectando de manera desproporcionada a poblaciones vulnerables. No obstante, su caracterización precisa enfrenta desafíos metodológicos derivados de la heterogeneidad de los materiales artificiales, la geometría tridimensional de las ciudades y la variabilidad de la emisividad superficial.

Para abordar estos desafíos, el presente trabajo se centra en el desarrollo y aplicación de la metodología UVEG-TES. Esta aproximación permite procesar de forma autónoma la base de datos de productos de Nivel 1B de los satélites MODIS (*Terra* y *Aqua*). El núcleo del flujo de trabajo consiste en la generación de una base de datos propia de Nivel 2 (LST y emisividad), mediante la integración de perfiles atmosféricos de reanálisis ERA5 y el modelo de transferencia radiativa RTTOV. Este refinamiento metodológico permite superar las limitaciones de los productos operativos estándar en entornos urbanos complejos, garantizando una precisión validada frente a estaciones *in situ*.

A partir de esta serie homogénea, se realiza un análisis de productos de Nivel 3 en 56 grandes ciudades del mundo durante el periodo 2003-2023. Se emplea una delimitación dinámica de áreas urbanas y rurales basada en la triangulación de Voronoi (Gold *et al.*, 1997) para cuantificar la intensidad del SUHI, junto con indicadores de degradación térmica como el *Urban*

Thermal Field Variance Index (UTFVI), el *Discomfort Index* (DI) y la identificación de hotspots o puntos calientes. Finalmente, la consistencia de la serie temporal generada permite no solo estimar la evolución histórica del impacto del cambio climático en las grandes aglomeraciones urbanas, sino también establecer bases robustas para la predicción de futuras olas de calor, proporcionando una herramienta esencial para el diseño de estrategias de adaptación urbana a escala global.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio y base de datos multitemporal

El estudio se centra en 56 grandes aglomeraciones urbanas distribuidas globalmente, seleccionadas por su relevancia demográfica y diversidad climática. La base de datos comprende 20 años de observaciones (2003-2023) provenientes de los sensores MODIS a bordo de las plataformas *Terra* y *Aqua*. Se han procesado radiancias de Nivel 1B (MOD021KM/MYD021KM) y datos de geolocalización (MOD03/MYD03). La distribución espacial de las ciudades de estudio se presenta en la Figura 1, donde se observa la representatividad en todos los continentes y regímenes climáticos (desde áridos hasta tropicales).

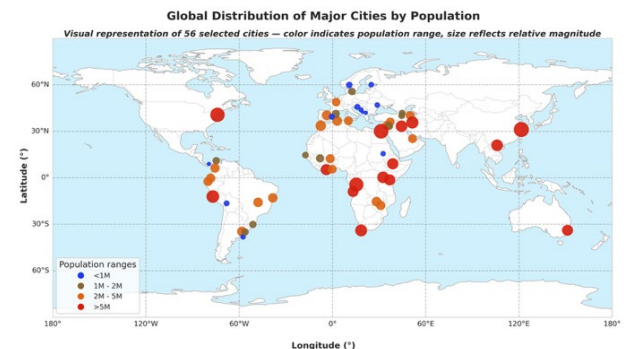


Figura 1. Distribución global de las 56 ciudades de estudio, según el número de habitantes.

Para garantizar la precisión en la corrección atmosférica, se han integrado perfiles de reanálisis ERA5 (ECMWF) con resolución horaria, que proporcionan la estructura vertical de la atmósfera (temperatura y humedad) en el momento exacto de la adquisición satelital.

2.2. Generación del producto de Nivel 2

La recuperación de la Temperatura de la Superficie Terrestre (LST) se fundamenta en el algoritmo UVEG-TES. Este flujo de procesamiento (Fig. 2) transforma las radiancias medidas en el tope de la atmósfera en

parámetros biofísicos de superficie mediante la resolución de la ecuación de transferencia radiativa. El proceso utiliza el modelo RTTOV para simular la emitancia y transmitancia atmosférica píxel a píxel.

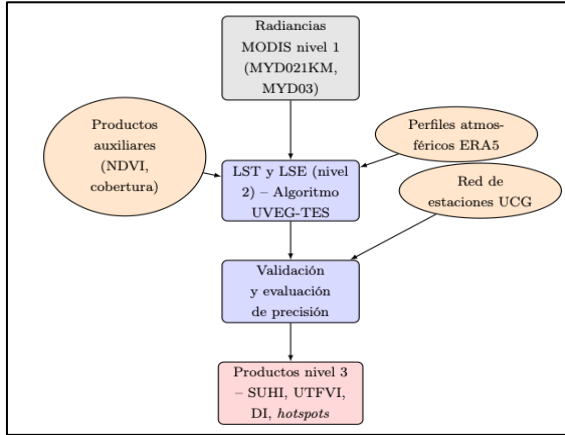


Figura 2. Cadena de procesos, para la generación y validación de productos de Nivel 2 y 3 a partir de radiancias de Nivel 1.

Un aspecto crítico de esta metodología es la validación de los productos generados. Los datos de LST de Nivel 2 de UVEG han sido validados rigurosamente mediante dos enfoques: en primer lugar, una comparación cruzada (*cross-validation*) con los productos operativos de la NASA (MOD21 y MYD21); en segundo lugar, una validación absoluta frente a mediciones de temperatura *in situ* procedentes de redes de estaciones meteorológicas y radiométricas. Estos resultados confirman una incertidumbre inferior a 1 K, lo que garantiza la fiabilidad de la serie temporal para el análisis del impacto del cambio climático.

2.3. Procesamiento de Nivel 3 y cuantificación de indicadores urbanos

El paso del producto de Nivel 2 al Nivel 3 constituye la etapa de análisis espacial y generación de indicadores climáticos (Fig. 2). En esta fase, se aplica una delimitación dinámica de las áreas urbanas y rurales mediante la triangulación de Voronoi (Gold *et al.*, 1997), permitiendo una comparación estandarizada entre ciudades de distinta morfología. A partir de la LST recuperada, se calculan diversos índices térmicos que caracterizan el impacto del calentamiento en las aglomeraciones. Las expresiones matemáticas de estos indicadores se detallan a continuación. El índice SUHI (Ecuación 1) define la magnitud de la anomalía térmica urbana, mientras que el UTFVI (Ecuación 2) y el DI (Ecuación 3) permiten evaluar el estrés ecológico y humano, respectivamente.

$$LST_{URBAN} - LST_{RURAL} \quad (1)$$

$$UTFVI = 1 - \frac{LST_{urban_{mean}}}{LST_{urban_{pixel}}} \quad (2)$$

$$Di = LST - (0.55 - 0.005 \cdot RH) \cdot (LST - 14.5) \quad (3)$$

$$LST_{pixel} > LST_{\{media\}} + k \cdot \sigma_{\{LST\}} \quad (4)$$

Finalmente, la identificación de *Hotspots* (Ecuación 4) se realiza mediante umbrales estadísticos de anomalía, lo que permite detectar zonas de especial vulnerabilidad dentro de la trama urbana.

3. RESULTADOS

La metodología UVEG-TES permitió procesar 4,29 millones de imágenes en la infraestructura JASMIN, generando 21 años (2003–2023) de datos diarios de LST y LSE para 56 ciudades. El uso de perfiles ERA5 y el modelo RTTOV mantiene una producción continua de productos de Nivel 2, con una precisión validada frente a estaciones terrestres (RMSE entre 1,1 K y 2,7 K). Destaca el rendimiento nocturno, donde el algoritmo redujo el RMSE en 0,1 K respecto a los productos operativos de la NASA. Asimismo, la emisividad mostró discrepancias inferiores al 2%, asegurando una alta estabilidad espectral en entornos urbanos heterogéneos.

El análisis revela un marcado gradiente de calentamiento liderado por urbes en regiones áridas, como Bagdad (+0,50 K/década) y Doha (+0,66 K/década), vinculado a la densificación y la baja capacidad de enfriamiento nocturno. En contraste, ciudades del hemisferio sur y zonas oceánicas (Sydney o Buenos Aires) presentaron una estabilidad notable con cambios totales acumulados inferiores a 0,5 K. La intensidad del SUHI, calculada mediante triangulación de Voronoi (Gold *et al.*, 1997), confirmó que el contraste térmico depende de la configuración regional: Barcelona (intensidad de +3,8 K) superó a ciudades desérticas debido a su entorno rural vegetado. Además, el análisis de *hotspots* identificó que hasta el 25% del área en ciudades como Aleppo actúa como foco crítico de calor.

La serie temporal muestra un incremento sostenido de la LST nocturna con una tasa global ponderada de +0,95 K por década, acelerándose notablemente desde 2015 (Sobrinho *et al.*, 2020). Existe una marcada asimetría entre hemisferios: el Norte registra una LST media de 293,4 K con un cambio total de +2,2 K (+1,10 K/década), mientras que el Sur mantiene una media de 284,5 K y un incremento de +1,6 K (+0,80 K/década). Esta disparidad se traduce en una mayor frecuencia de eventos extremos en el norte, con noches que superan los 300 K. El estudio advierte que, aunque el sur es hoy más estable por la influencia oceánica, las tendencias atmosféricas de ERA5 sugieren que esta capacidad de amortiguación podría verse comprometida en el futuro.

4. DISCUSIÓN

El algoritmo UVEG-TES demuestra una robustez superior al generar series de 21 años con una incertidumbre de K frente a productos oficiales (Guillevic *et al.*, 2018). El uso de perfiles ERA5 y el modelo RTTOV son una alternativa estable para la recuperación de la

LST en periodos largos, superando las limitaciones de los algoritmos convencionales en superficies urbanas heterogéneas. Asimismo, la intensidad del SUHI queda vinculada a la interacción entre forzamientos climáticos y morfología local; mientras los climas áridos muestran fenómenos más persistentes, las urbes costeras presentan intensidades menores por la regulación marina. Se confirma, además, una retroalimentación positiva en ciudades con temperaturas elevadas, alineada con las proyecciones de extremos térmicos del IPCC (2021).

Metodológicamente, la triangulación de Voronoi (Gold *et al.*, 1997) y el coeficiente de expansión urbana (Sobrino *et al.*, 2020) suponen avances críticos que minimizan errores espaciales y garantizan la comparabilidad temporal ante el crecimiento de las ciudades. A pesar de centrarse en datos nocturnos, los productos de Nivel 3 generados estandarizan los índices térmicos a escala global. Esta capacidad de diagnóstico permite identificar zonas de alta vulnerabilidad, fundamentando estrategias de mitigación y adaptación climática basadas en evidencias físicas precisas para proteger a la población frente al calentamiento global.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo valida la metodología UVEG-TES como una herramienta robusta para la monitorización térmica global. Al generar una base de datos propia de 21 años para 56 ciudades, se ha logrado una precisión de K y una trazabilidad conforme a los estándares CEOS-LPV. El uso de la triangulación de Voronoi y un coeficiente de expansión urbana ha resultado crucial para corregir la subestimación del efecto SUHI en ciudades en crecimiento, revelando que la intensidad de la isla de calor depende del contraste morfológico local y mostrando una intensificación crítica de extremos térmicos en climas áridos.

Más allá del registro histórico, esta serie permite entrenar modelos de aprendizaje automático para predecir futuras olas de calor y el alcance del efecto SUHI ante la expansión urbana. La metodología ya se ha validado en campañas reales y se presenta como el flujo operativo para la nueva generación de satélites de alta resolución, estableciendo un estándar para la futura monitorización del planeta. En definitiva, este estudio aporta la evidencia física necesaria para entender el calentamiento global y diseñar estrategias de mitigación eficaces que protejan a la población.

6. AGRADECIMIENTOS

Contribución del IPL a la explotación científica de las misiones térmicas de alta resolución espacial: LSTM, TRISHNA y SBG, (financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España, la Agencia Estatal de Investigación (AEI/10.13039/501100011033), en el marco del proyecto PID2023-150737OB-I00).

Indicadores Medioambientales y Fenómenos Adversos en la Comunidad Valenciana usando datos de satélite (INMESAT), (financiado por la Conselleria de Educación, Cultura y Universidades de la Generalitat Valenciana en el marco del programa PROMETEO 2024 (Subvenciones

para la realización de proyectos de I+D+i para grupos de investigación de excelencia), con referencia CIPROM2023-42).

7. REFERENCIAS

- Gillespie, A. and Rokugawa, S. and Matsunaga, T. and Cothorn, J. S. and Hook, S. and Kahle, A. B. (1998). A temperature and emissivity separation algorithm for ASTER images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, (36). <https://doi.org/10.1109/36.700995>
- Guillevic, P. C., Göttsche, F.-M., Nickeson, J., Hulley, G., Ghent, D., Yu, Y., Trigo, I. F., Hook, S., Sobrino, J. A., Remedios, J., Román, M., & Camacho, F. (2018). Land Surface Temperature Product Validation Best Practice Protocol (v1.1, Best Practice for Satellite-Derived Land Product Validation). CEOS WGCV Land Product Validation (LPV) Subgroup. <https://doi.org/10.5067/doc/ceoswgcvlpv/lst.001>
- Gold, C. M., Remmele, P. R., & Roos, T. (1997). Voronoi Methods in GIS. In M. van Kreveld, J. Nievergelt, T. Roos, & P. Widmayer (Eds.), *Algorithmic Foundations of Geographic Information Systems* (Vol. 1340, pp. 21–35). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-63818-0_2
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Koetz, B., Bastiaanssen, W. G. M., Berger, M., Defourny, P., & others. (2018). High Spatio-Temporal Resolution Land Surface Temperature Mission a Copernicus Candidate Mission in Support of Agricultural Monitoring. IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 4078–4081. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8517433>
- Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., & Paolini, L. (2008). Split-Window Coefficients for Land Surface Temperature Retrieval from Low-Resolution Thermal Infrared Sensors. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 5(4), 806–809. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:12347129>
- Sobrino, J. A., & Irakulis, I. (2020). A Methodology for Comparing the SUHI in Selected Urban Agglomerations Around the World from Sentinel-3 SLSTR Data. *Remote Sensing*, 12(12), 2052. <https://doi.org/10.3390/rs12122052>