

RELEVANCIA DE LA INTEGRACIÓN DE DATOS HIGROTÉRMICOS URBANOS MONITORIZADOS A ESCALA LOCAL PARA LA REALIZACIÓN DE SIMULACIONES ENERGÉTICAS DE EDIFICIOS

M. Lucas Bonilla, B. Montalbán Pozas, J. M. Lorenzo Gallardo, M. S. Álvarez Rojas

Universidad de Extremadura, Cáceres, España

RESUMEN

La representación del clima local es un aspecto fundamental en la simulación energética de edificios y en la evaluación del confort térmico interior. Sin embargo, en la práctica habitual se utilizan archivos climáticos estándar que no capturan la variabilidad térmica existente dentro de una misma ciudad. Esta homogeneidad contrasta con la realidad observada en entornos urbanos, donde la morfología, la presencia de vegetación, la densidad edificatoria y las características del espacio público generan variaciones climáticas locales que afectan directamente al comportamiento térmico de los edificios. En este contexto, el uso de datos locales, obtenidos mediante redes de monitorización urbanas, supone una oportunidad para acercar la simulación energética a condiciones más representativas del entorno construido. Así, el presente trabajo plantea una aproximación para incorporar información climática local real, procedente de la red higrotérmica del proyecto OLADAPT, en simulaciones dinámicas realizadas con DesignBuilder. El enfoque se centra en analizar cómo las diferencias térmicas registradas en zonas urbanas contrastadas pueden influir en variables clave como el confort térmico interior y en la demanda energética asociada a refrigeración y calefacción. Para ello, las técnicas de integración climática pueden variar, desde ajustes parciales en los perfiles horarios hasta la generación y uso de archivos climáticos urbanos específicos, con el objetivo principal de explorar cómo la sustitución del clima estándar por condiciones más próximas al clima local real modifica los resultados de las simulaciones. Las diferencias entre las simulaciones realizadas con archivos climáticos locales respecto a las realizadas con archivos climáticos estándar evidencian que el clima local urbano puede modificar de forma significativa el comportamiento térmico del edificio, reforzando la necesidad de utilizar información climática local para obtener estimaciones más representativas y ajustadas al contexto real. En conjunto, este enfoque propone avanzar hacia simulaciones energéticas más contextuales y adaptadas a la realidad urbana, modificando los procedimientos estándar o incorporando información climática local de manera que se aporten mejoras en la precisión del resultado. De este modo, esta investigación contribuye al desarrollo de herramientas y metodologías que permiten un diseño más informado de edificios y espacios urbanos, especialmente en ciudades donde la variabilidad térmica puede tener un impacto directo en el bienestar de la población y en la eficiencia energética del parque edificatorio.

PALABRAS CLAVE: datos climáticos locales, simulación energética, confort térmico interior, variabilidad térmica intraurbana, demanda energética del edificio.

1. INTRODUCCIÓN

La simulación energética de edificios se ha consolidado como una herramienta clave para analizar el comportamiento térmico, evaluar el confort interior y estimar la eficiencia energética del entorno construido. Estos estudios resultan especialmente relevantes en un contexto global marcado por el cambio climático, el aumento de las temperaturas y la necesidad de reducir las emisiones asociadas al parque edificatorio. En este sentido, la importancia de las simulaciones energéticas radica en su capacidad para anticipar los efectos de las decisiones de diseño, rehabilitación o gestión energética, contribuyendo a la toma de decisiones informadas en políticas de mitigación y adaptación.

Uno de los elementos fundamentales en cualquier simulación energética es la caracterización climática. De manera habitual, los modelos de simulación utilizan archivos climáticos estándar, generalmente basados en estaciones meteorológicas de referencia, de ámbito regional o aeroportuario. Sin embargo, estos archivos no reflejan de forma adecuada la heterogeneidad climática existente dentro de las ciudades, derivados de factores como la morfología urbana, la densidad edificatoria, los materiales, la presencia de vegetación o la configuración del espacio público. Estas diferencias intraurbanas generan microclimas diferenciados y condicionan de manera directa el comportamiento térmico de los edificios. Este hecho se manifiesta de forma evidente a través de la isla de calor urbana (UHI), ampliamente documentada en ciudades de diferentes tamaños y regiones climáticas [1] - [4] y en diversas localidades españolas [5] - [8].

A pesar de esta evidencia, los marcos normativos actuales, como la EPBD [9] o las zonificaciones climáticas nacionales, no incorporan explícitamente la variabilidad térmica a escala urbana, evaluando edificios situados en entornos urbanos contrastados bajo idénticas condiciones climáticas estándar. Esta limitación resulta especialmente crítica si se considera que el impacto de los UHIs puede alterar de manera significativa la demanda energética de climatización, aumentando las necesidades de refrigeración y reduciendo las de calefacción [10] - [12]. Esto evidencia la necesidad de avanzar hacia herramientas capaces de integrar datos climáticos locales representativos, de modo que no se comprometa la fiabilidad de los resultados obtenidos de simulaciones.

En este marco, la clasificación Local Climate Zones (LCZ), ampliamente validada en la literatura [13], [14], ofrece un marco robusto para caracterizar la forma y el uso del suelo urbano, permitiendo identificar áreas con comportamientos térmicos diferenciados. No obstante, esta clasificación no cuantifica por sí sola la magnitud real de las diferencias térmicas ni incorpora variables medidas como temperatura del aire, humedad relativa o viento [15]. De manera complementaria, indicadores como Heating Degree Days (HDD) y Cooling Degree Days (CDD) permiten estimar de forma sencilla y ampliamente contrastada la variación de la demanda térmica de los edificios [16] - [19], siempre que se disponga de datos higrotérmicos fiables con resolución temporal y espacial adecuada [7], [20]. Este tema ha sido estudiado previamente por los autores del presente trabajo usando como caso de estudio la ciudad de Cáceres; como resultado se confirmó la existencia de diferencias térmicas claras entre las distintas zonas de una ciudad, incluso en zonas próximas [21].

La creciente disponibilidad de redes de monitorización higrotérmica urbanas de sensores, impulsadas por el desarrollo de ciudades inteligentes y tecnologías IoT, ha permitido avances significativos en la monitorización climática local [22], [23]. No obstante, la calidad y consistencia de los datos generados

por redes ciudadanas o sensores de bajo coste pueden ser variables, lo que ha motivado numerosos estudios centrados en su validación, representatividad y control de calidad [24] - [26], así como en la necesidad de alinearlas con estándares de la Organización Meteorológica Mundial [27], [28]. En este escenario, la existencia de redes diseñadas específicamente para monitorización urbana, como la red higrotérmica desarrollada en la ciudad de Cáceres en el marco del proyecto OLADAPT, permite integrar datos climáticos urbanos robustos y consistentes en simulaciones energéticas. Se ha avalado la fiabilidad de la red OLADAPT frente a otras redes ciudadanas alternativas, existentes en la ciudad, mediante el análisis de la calidad, consistencia y representatividad de sus datos [29].

En este contexto, el presente trabajo aborda la relevancia de incorporar estos datos climáticos locales monitorizados en simulaciones dinámicas realizadas con el software DesignBuilder, con el objetivo de evaluar cómo la sustitución o el ajuste de los archivos climáticos estándar por condiciones locales reales, influye y modifica los resultados de las simulaciones. Se plantea como hipótesis que el uso de archivos climáticos locales en las simulaciones energéticas modifica de forma significativa la estimación del comportamiento térmico de los edificios, en comparación con el uso de datos climáticos estándar, mejorando la representatividad de los resultados en contextos urbanos.

2. DESARROLLO / METODOLOGÍA

El presente apartado se estructura en dos partes diferenciadas, por un lado, los materiales utilizados, especificando el software empleado, el caso de estudio y la procedencia de los datos climáticos, y, por otro, la metodología seguida, describiendo detalladamente todo el proceso seguido durante el trabajo.

2.1. Materiales

En base a los estudios previos de los autores, y debido a la disponibilidad de datos climáticos locales, en tiempo real y con una periodicidad constante, este trabajo se centra en la ciudad de Cáceres.

2.1.1. Software de simulación, variables analizadas y criterios de evaluación

Para la realización de las simulaciones energéticas se emplea el software DesignBuilder, basado en el motor de cálculo EnergyPlus. Este software permite la modelización detallada del comportamiento energético y térmico de edificios, así como la introducción de archivos climáticos personalizados.

2.1.2. Modelo de edificio para simulación energética

Se utiliza como caso de estudio un edificio plurifamiliar de la ciudad de Cáceres, representativo de una parte significativa del parque residencial existente del municipio, tanto por su morfología como por sus soluciones constructivas. Este consta de cinco plantas de altura y cuatro viviendas por planta, que se organizan en torno a un núcleo de comunicaciones verticales. Las viviendas se distribuyen en las cuatro orientaciones principales. Respecto al sistema constructivo, se han usado los datos del proyecto original, de características constructivas anteriores a la normativa energética actual.

2.1.3. Datos climáticos locales

Los datos climáticos locales usados proceden de una de las 25 estaciones de la red de monitorización higrotérmica urbana del proyecto OLADAPT. Estas estaciones registran de forma continua desde junio de 2024 y con una elevada resolución temporal (cada 20 minutos) dos variables climáticas relevantes;

temperatura y humedad relativa. De este modo, se usan los datos de 2025, específicamente los de la estación situada en el barrio Reyes Huertas, en una zona con un 90% de superficie edificada [21].

2.2. Métodos

La metodología del presente estudio se basa en comparar los resultados obtenidos en simulaciones que usan archivos climáticos estándar frente a aquellas que utilizan archivos climáticos urbanos específicos. Para ello, se utiliza un modelo base único, que mantiene las características constructivas, usos y sistemas de climatización constantes, de modo que la única variable que cambia es el archivo climático utilizado, permitiendo así realizar comparativas sobre el impacto de distintos archivos climáticos en los resultados de las simulaciones. Bajo este enfoque comparativo se ha planteado como estrategias el uso de un archivo climático que integra tanto datos basados en condiciones reales locales monitorizadas, como datos de aproximaciones convencionales. Los pasos a seguir son los siguientes:

2.2.1. Elaborar el modelo base para las simulaciones

El modelo del edificio se ha generado reproduciendo fielmente su geometría, orientación y materiales. Los sistemas de climatización y producción de ACS se modelizan de acuerdo con soluciones habituales en este tipo de edificaciones, considerando sistemas individuales por vivienda. Asimismo, los perfiles de uso, ocupación y cargas internas se definen conforme a valores estándar establecidos en normativa y bibliografía de referencia. Las zonas térmicas del modelo correspondientes a las distintas viviendas.

2.2.2. Generar archivos climáticos locales

A partir de los registros monitorizados en 2025 por la estación seleccionada, se realiza un proceso de tratamiento y validación de los datos para garantizar su coherencia y continuidad. Este proceso elimina los valores erróneos y anómalos, completa lagunas mediante métodos de interpolación y homogeneiza la resolución temporal original de los datos (20 minutos). Posteriormente, estos datos reales se integran en un archivo climático específico en formato EnergyPlus Weather (EPW) siguiendo los pasos descritos a continuación. Es necesario saber que los archivos EPW presentan un formato y orden estricto de filas y columnas. En primer lugar, se sitúan ocho líneas de cabecera con los metadatos de la estación, seguidas por 8760 filas donde se estructuran los datos horarios correspondientes a un año no bisiesto. Cada fila cuenta con 35 campos o columnas, primero, las columnas relativas al dato temporal (año, mes, día, hora (de 1 a 24) y minuto (siempre 60)) y luego, las que recogen los valores de las variables climatológicas. Por último, y de manera ocasional, puede haber otros campos adicionales.

1. Completar los datos de la cabecera: como ubicación del sensor, ID y zona climática.
2. Estructurar los datos disponibles (temperatura del aire y humedad relativa) en la periodicidad de 1 hora, haciendo la media de los tres registros efectuados por la estación en esa hora.
3. Calcular la temperatura de rocío mediante la fórmula de Magnus-Tetens (1):

$$T_{\text{punto de rocío}} = \ln\left(\frac{HR}{100}\right) + \frac{a \cdot T}{b + T} \quad (1)$$

donde T es la temperatura del aire, HR es la humedad relativa, a es 17.27, y b es 237,7 °C.

4. Completar variables faltantes. En el caso de la presión atmosférica se usan los valores registrados por la estación de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) de la ciudad de Cáceres. Para el resto de las variables climáticas no disponibles, como radiación solar, difusa o directa, viento, nubosidad o iluminancia, se mantienen los valores del archivo EPW estándar.
5. Dar formato al archivo siguiendo la estructura de un archivo EPW. Para ello el archivo no debe tener celdas vacías y los signos de separación serán el punto para los valores decimales y la coma para las columnas. Una vez estructurado, se debe nombrar con la terminación “.epw” y guardar bajo el formato de texto plano (UTF-8 sin BOM).
6. Validar el archivo para usarse en DesignBuilder. Para ello se abre con WeatherConverter (EnergyPlus) o se carga en DesignBuilder, se verifica que no hay errores.

2.2.3. Ejecutar la simulación con datos climáticos estándar y con datos específicos

Las simulaciones se ejecutan en régimen anual, con divisiones por mes, día y hora, y aportan resultados sobre demanda energética de calefacción y refrigeración e indicadores de confort térmico interior, como la temperatura operativa y el número de horas fuera de los rangos de confort. La simulación estándar usa el archivo climático trae por defecto el software DesignBiulder para la ciudad de Cáceres.

2.2.4. Realizar comparativa de resultados de las simulaciones

Finalmente, los resultados derivados de cada una de las simulaciones se analizan de forma comparativa, permitiendo así evaluar el impacto de cambiar los archivos climáticos estándar por datos climáticos locales. El análisis comparativo se centra en las variables relativas a la demanda energética y el confort térmico. En este sentido, el estudio del confort térmico interior se ha usado como indicador el número de horas fuera de los rangos de confort [30]. El cálculo se ha realizado mediante el método de confort adaptativo, definido en la norma EN 16798-1, que establece los límites de bienestar térmico en función de la temperatura exterior de bulbo seco. Cada hora se ha clasificado como “dentro o fuera de confort”, distinguiendo entre disconfort por calor y frío, según si la temperatura operativa es superior o inferior a los límites establecidos mediante la siguiente fórmula (2):

$$(0,33 \cdot T_{rm} + 18,8) - 2 \leq T_i \leq (0,33 \cdot T_{rm} + 18,8) + 2 \quad (2)$$

donde T_i es el rango de temperaturas de bienestar adaptativo, T_{rm} es la temperatura media del aire exterior de los últimos 7 días, y +2 y -2 los límites de aceptación de confort.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de las simulaciones muestran que la **demanda energética anual** (Figura 1a) presenta grandes diferencias según el archivo climático empleado. Con el EPW específico, la demanda de calefacción se reduce un 23 % y la de refrigeración prácticamente se duplica, lo que indica inviernos más suaves y veranos más exigentes. A nivel mensual (Figura 1b), la demanda de calefacción se concentra entre octubre y mayo, con máximos en diciembre y enero en ambos casos. Por su parte,

aunque la demanda de refrigeración se sitúa entre junio y septiembre en ambos casos, los picos máximos difieren, con el EPW estándar se da en julio y con el específico en agosto. Además, cabe destacar el mes de mayo, ya que la simulación con el EPW específico registra simultáneamente demanda de calefacción y refrigeración, aunque esta última es mínima. Respecto a las diferencias entre ambos son más notables en los meses de junio y octubre, y más similares en marzo y septiembre.

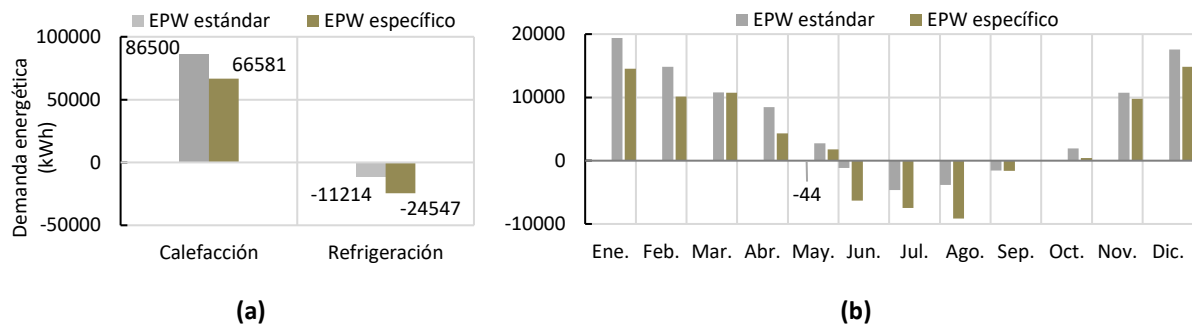


Figura 1. Comparativa de datos de demanda energética de calefacción y refrigeración: **(a)** Valores anuales. **(b)** Valores mensuales.

Respecto al **confort térmico** anual (Figura 2a) se aprecia que en ambas simulaciones predomina el disconfort por frío (>70 %), lo que evidencia un problema térmico principalmente en el periodo invernal, que podría estar asociado a características constructivas previas a la normativa actual. La simulación con el EPW específico mejora ligeramente el comportamiento, ya que reduce 326 horas de disconfort por frío y aumenta 212 horas de confort, pero introduce 114 horas de disconfort por calor, inexistentes con el EPW estándar. El análisis horario (Figura 2b) explica el elevado porcentaje de disconfort por frío. Este se debe a que la **temperatura operativa** que queda mayoritariamente por debajo de la **temperatura de confort adaptativo**, en especial en la simulación estándar. En la simulación específica, esta diferencia se reduce, ya que la temperatura operativa interior aumenta, especialmente en los meses más cálidos, haciendo que se reduzca el disconfort por frío y se ocasionen momentos puntuales de disconfort por calor al superar los rangos de la temperatura de confort adaptativa. Además, cabe destacar que en el EPW específico, las temperaturas presentan una mayor oscilación, recogiendo variaciones y eventos extremos normales, ocasionados principalmente en periodo estival, que no quedan representados de manera adecuada en el archivo climático estándar. Destaca el mes de mayo de la simulación específica, donde la temperatura oscila entre 19 y 31 °C, lo que explica la coexistencia de demanda de calefacción y refrigeración observada previamente.

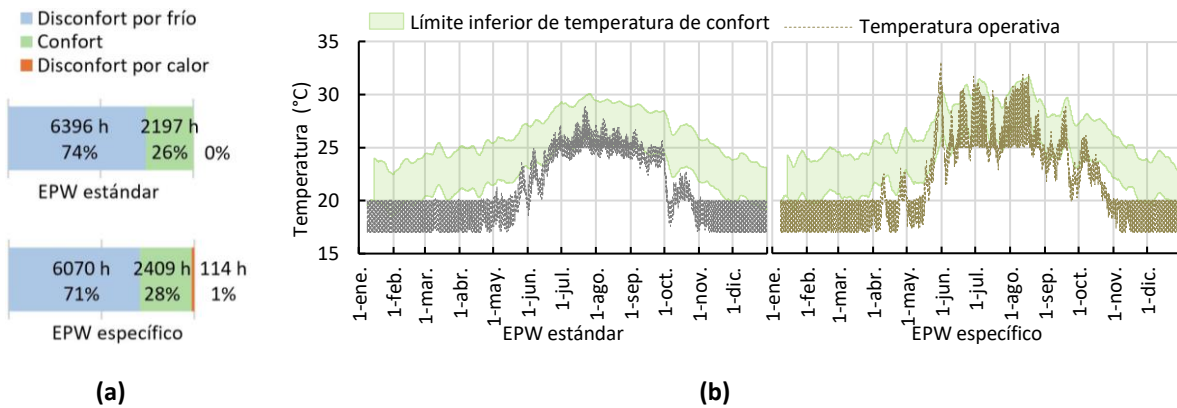


Figura 2. Comparativa de datos de confort: **(a)** Número de horas y porcentaje anual. **(b)** Evolución horaria de temperatura operativa y de confort.

Como síntesis final, los resultados obtenidos muestran diferencias significativas entre la simulación realizada con el archivo climático estándar y aquella basada en el archivo climático local. Sin embargo, este edificio presenta un comportamiento claramente deficitario en condiciones invernales, independientemente del archivo climático empleado, aunque el uso del EPW específico suaviza parcialmente esta situación, ya que presenta un clima ligeramente más cálido.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos confirman la hipótesis inicial: el uso de datos climáticos locales monitorizados modifica de forma sustancial los resultados de las simulaciones, reforzando la idea de que el clima urbano local es un factor determinante en el comportamiento energético de los edificios.

El archivo climático específico utilizado refleja mayores temperaturas que el EPW estándar, debido a la diferencia en el entorno del sensor de toma de datos. Las zonas urbanas, con mayor densidad edificatoria y menor presencia de vegetación, suelen generar un incremento notable en la demanda energética de refrigeración y una reducción relativa de la demanda de calefacción, tal y como se evidencia en este estudio. Asimismo, los EPW generados a través de la monitorización local de datos reales permite registrar variaciones y eventos extremos normales, reflejando de manera más precisa las condiciones reales del entorno. Estos eventos pueden aumentar el número de horas de desconfort térmico en determinados periodos del año, especialmente durante episodios de calor extremo. Esta información pone de manifiesto que el uso de datos climáticos homogéneos a escala urbana puede no representar el entorno urbano real, ya que pueden ocultar situaciones críticas asociadas a la variabilidad térmica urbana o a la presencia de fenómenos como la isla de calor. Por tanto, la evaluación bajo condiciones climáticas promedio puede subestimar o sobreestimar las necesidades reales del edificio y, en consecuencia, distorsionar la evaluación del desempeño energético y el dimensionado de los sistemas de climatización. En este sentido, la integración en las simulaciones energéticas de archivos climáticos específicos de escala local mejora la representatividad del comportamiento y permite avanzar hacia modelos más realistas y contextualizados.

El presente trabajo pone de manifiesto la necesidad de revisar los procedimientos estándar de simulación energética e incorporar información climática local siempre que sea posible, especialmente

en ciudades donde las diferencias térmicas locales tienen un impacto directo en el consumo energético y en el bienestar de la población. Asimismo, este trabajo ha demostrado la viabilidad técnica de generar archivos EPW personalizados, que integren datos reales validados y obtenidos a partir de redes de monitorización urbana. Este procedimiento permite avanzar hacia simulaciones más precisas, facilitar un análisis más robusto y contribuir a una planificación energética más ajustada, más eficaz y mejor orientadas, especialmente en el contexto actual de cambio climático.

Como líneas futuras de investigación, se propone ampliar el análisis a otras zonas climáticas urbanas y analizar el impacto en diferentes tipologías edificatorias, con el fin de profundizar en la influencia del microclima urbano sobre el comportamiento térmico de los edificios y consolidar metodologías que integren el clima urbano real en la simulación energética.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido cofinanciado al 85% por la Unión Europea, Fondo Europeo de Desarrollo Regional, y la Junta de Extremadura, Autoridad de Gestión: Ministerio de Hacienda, Ayuda GR24169. Los datos utilizados se han obtenido a través del proyecto Oladapt: Olas de calor y ciudades: adaptación y resiliencia del entorno construido (PID2022-138284OB-C31), financiado por el MCIN/AEI/10.13039/501100011033/FEDER, UE. Asimismo, ha sido La investigadora Marta Lucas Bonilla está siendo financiada por la Junta de Extremadura (Consejería de Economía, Ciencia y Agenda Digital), cofinanciada por el Fondo Social Europeo Plus (FSE+) en el marco del Programa Operativo FSE+ Extremadura 2021–2027, mediante las ayudas para la contratación de personal investigador predoctoral en formación del Sistema Extremeño de Ciencia, Tecnología e Innovación (PD23036).

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. Chapman, J. E. M. Watson, A. Salazar, M. Thatcher, and C. A. McAlpine, “The impact of urbanization and climate change on urban temperatures: a systematic review,” *Landsc. Ecol.*, vol. 32, no. 10, pp. 1921–1935, Oct. 2017, doi: 10.1007/s10980-017-0561-4.
- [2] K. Ward, S. Lauf, B. Kleinschmit, and W. Endlicher, “Heat waves and urban heat islands in Europe: A review of relevant drivers,” *Science of the Total Environment*, vol. 569–570, pp. 527–539, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.06.119.
- [3] V. Sangiorgio, S. Bruno, and F. Fiorito, “Comparative Analysis and Mitigation Strategy for the Urban Heat Island Intensity in Bari (Italy) and in Other Six European Cities,” *Climate*, vol. 10, no. 11, Nov. 2022, doi: 10.3390/cli10110177.
- [4] Z. Yin, Z. Liu, X. Liu, W. Zheng, and L. Yin, “Urban heat islands and their effects on thermal comfort in the US: New York and New Jersey,” *Ecol. Indic.*, vol. 154, p. 110765, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.ecolind.2023.110765.
- [5] J. A. Acero, J. Arrizabalaga, S. Kupski, and L. Katschner, “Urban heat island in a coastal urban area in northern Spain,” *Theor. Appl. Climatol.*, vol. 113, no. 1–2, pp. 137–154, Jul. 2013, doi: 10.1007/s00704-012-0774-z.
- [6] D. Rasilla, F. Allende, A. Martilli, and F. Fernández, “Heat waves and human well-being in Madrid (Spain),” *Atmosphere (Basel)*, vol. 10, no. 5, May 2019, doi: 10.3390/atmos10050288.

- [7] S. Barrao, R. Serrano-Notivoli, J. M. Cuadrat, E. Tejedor, and M. A. Saz Sánchez, "Characterization of the UHI in Zaragoza (Spain) using a quality-controlled hourly sensor-based urban climate network," *Urban Clim.*, vol. 44, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.uclim.2022.101207.
- [8] L. Wei and J. A. Sobrino, "Surface urban heat island analysis based on local climate zones using ECOSTRESS and Landsat data: A case study of Valencia city (Spain)," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 130, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.jag.2024.103875.
- [9] C. de la U. E. Parlamento Europeo, *DIRECTIVE (EU) 2024/1275 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 24 April 2024 on the energy performance of buildings (recast)*. 2024. [Online]. Available: <http://data.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj>
- [10] Y. Zou, Z. Wu, B. Li, and Y. Jia, "Cooling Energy Challenges in Residential Buildings During Heat Waves: Urban Heat Island Impacts in a Hot-Humid City," *Buildings*, vol. 14, no. 12, Dec. 2024, doi: 10.3390/buildings14124030.
- [11] F. Hashemi, P. Najafian, N. Salahi, S. Ghiasi, and U. Passe, "The Impact of the Urban Heat Island and Future Climate on Urban Building Energy Use in a Midwestern U.S. Neighborhood," *Energies (Basel)*, vol. 18, no. 6, p. 1474, Mar. 2025, doi: 10.3390/en18061474.
- [12] P. Shen, Y. Ji, Y. Li, M. Wang, X. Cui, and H. Tong, "Combined impact of climate change and urban heat island on building energy use in three megacities in China," *Energy Build.*, vol. 331, p. 115386, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.enbuild.2025.115386.
- [13] B. Bechtel *et al.*, "Mapping Local Climate Zones for a Worldwide Database of the Form and Function of Cities," *ISPRS Int. J. Geoinf.*, vol. 4, no. 1, pp. 199–219, Feb. 2015, doi: 10.3390/ijgi4010199.
- [14] B. Bechtel and C. Daneke, "Classification of Local Climate Zones Based on Multiple Earth Observation Data," *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, vol. 5, no. 4, pp. 1191–1202, Aug. 2012, doi: 10.1109/JSTARS.2012.2189873.
- [15] I. D. Stewart and T. R. Oke, "Local Climate Zones for Urban Temperature Studies," *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 93, no. 12, pp. 1879–1900, Dec. 2012, doi: 10.1175/BAMS-D-11-00019.1.
- [16] R. Gupta, J. Mathur, and V. Garg, "Assessment of climate classification methodologies used in building energy efficiency sector," *Energy Build.*, vol. 298, p. 113549, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.enbuild.2023.113549.
- [17] ASHRAE, "ASHRAE Terminology, Degree Day," <https://terminology.ashrae.org/?entry=degree%20day>. Accessed: Oct. 09, 2025. [Online]. Available: <https://terminology.ashrae.org/?entry=degree%20day>
- [18] A. D'Amico, G. Ciulla, D. Panno, and S. Ferrari, "Building energy demand assessment through heating degree days: The importance of a climatic dataset," *Appl. Energy*, vol. 242, pp. 1285–1306, May 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.03.167.
- [19] M. De Rosa, V. Bianco, F. Scarpa, and L. A. Tagliafico, "Heating and cooling building energy demand evaluation; a simplified model and a modified degree days approach," *Appl. Energy*, vol. 128, pp. 217–229, Sep. 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.04.067.
- [20] G. Battista, L. Evangelisti, C. Guattari, M. Roncone, and C. A. Balaras, "Space-time estimation of the urban heat island in Rome (Italy): Overall assessment and effects on the energy performance of buildings," *Build. Environ.*, vol. 228, p. 109878, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109878.
- [21] M. Lucas Bonilla, C. Nuevo-Gallardo, J. M. Lorenzo Gallardo, and B. Montalbán Pozas, "Urban

Heat Islands: Their Influence on Building Heating and Cooling Energy Demand Throughout Local Climate Zones,” *Urban Science*, vol. 10, no. 1, p. 43, Jan. 2026, doi: 10.3390/urbansci10010043.

[22] O. O. Olaniyi, O. J. Okunleye, and S. O. Olabanji, “Advancing Data-Driven Decision-Making in Smart Cities through Big Data Analytics: A Comprehensive Review of Existing Literature,” *Current Journal of Applied Science and Technology*, vol. 42, no. 25, pp. 10–18, Aug. 2023, doi: 10.9734/cjast/2023/v42i254181.

[23] S. L. Ullo and G. R. Sinha, “Advances in Smart Environment Monitoring Systems Using IoT and Sensors,” *Sensors*, vol. 20, no. 11, p. 3113, May 2020, doi: 10.3390/s20113113.

[24] F. Meier, D. Fenner, T. Grassmann, M. Otto, and D. Scherer, “Crowdsourcing air temperature from citizen weather stations for urban climate research,” *Urban Clim.*, vol. 19, pp. 170–191, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.uclim.2017.01.006.

[25] A. Napoly, T. Grassmann, F. Meier, and D. Fenner, “Development and Application of a Statistically-Based Quality Control for Crowdsourced Air Temperature Data,” *Front. Earth Sci. (Lausanne)*, vol. 6, Aug. 2018, doi: 10.3389/feart.2018.00118.

[26] S. Bell, D. Cornford, and L. Bastin, “How good are citizen weather stations? Addressing a biased opinion,” *Weather*, vol. 70, no. 3, pp. 75–84, Mar. 2015, doi: 10.1002/wea.2316.

[27] World Meteorological Organization (WMO), *Guide to Instruments and Methods of Observation (Volume I - Measurement of Meteorological Variables, Volume II - Measurement of cryospheric variables, Volume III - Observing Systems, Volume IV - Space-based Observations and Volume V - Quality Assurance and Management of Observing Systems)*, 2023 edition., vol. I, II, III, IV and V. Geneva, Switzerland, 2023.

[28] T. E. Oke, “Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites,” 2006.

[29] M. Lucas Bonilla, I. T. Albalá Pedrera, P. Bustos García de Castro, A. Martín-Garín, and B. Montalbán Pozas, “Comparing Monitoring Networks to Assess Urban Heat Islands in Smart Cities,” *Applied Sciences*, vol. 15, no. 11, p. 6100, May 2025, doi: 10.3390/app15116100.

[30] E. DE Aplicación De Medidas De Rehabilitación En Edificios De Vivienda Y Su Impacto, “El confort térmico y la huella de carbono en nuestras viviendas.” [Online]. Available: www.ecodes.org