

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

Máster en Meteorología y Geofísica



TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

Modelización a mesoescala de la capa límite urbana sobre una ciudad costera. El caso de Valencia.

Mesoscale modelling of the urban boundary layer in a coastal city. The case of Valencia.

Ángel Sánchez Lorente

Tutor/es:

Alberto Martilli (CIEMAT)

Beatriz Sánchez Sánchez (CIEMAT)

Carlos Yagüe Anguís (UCM)

Curso académico 2023-24



Declaración Responsable sobre Autoría y Uso Ético de Herramientas de Inteligencia Artificial (IA)

Yo, **Ángel Sánchez Lorente**,

con DNI **06598237C**,

declaro de manera responsable que el/la presente:

Trabajo de Fin de Grado (TFG)

Trabajo de Fin de Máster (TFM)

Tesis Doctoral

Titulado:

Modelización a mesoescala de la capa límite urbana sobre una ciudad costera. El caso de Valencia.

Meso-scale modelling of the urban boundary layer in a coastal city. The case of Valencia.

es el resultado de mi trabajo intelectual personal y creativo, y ha sido elaborado de acuerdo con los principios éticos y las normas de integridad vigentes en la comunidad académica y, más específicamente, en la Universidad Complutense de Madrid.

Soy, pues, autor del material aquí incluido y, cuando no ha sido así y he tomado el material de otra fuente, lo he citado o bien he declarado su procedencia de forma clara -incluidas, en su caso, herramientas de inteligencia artificial-. Las ideas y aportaciones principales incluidas en este trabajo, y que acreditan la adquisición de competencias, son mías y no proceden de otras fuentes o han sido reescritas usando material de otras fuentes.

Asimismo, aseguro que los datos y recursos utilizados son legítimos, verificables y han sido obtenidos de fuentes confiables y autorizadas. Además, he tomado medidas para garantizar la confidencialidad y privacidad de los datos utilizados, evitando cualquier tipo de sesgo o discriminación injusta en el tratamiento de la información.

En Madrid, a **3 de junio de 2024**.

Resumen:

Eventos meteorológicos extremos, como olas de calor, cada vez son más comunes durante los veranos en el área mediterránea. El efecto de sobrecalentamiento urbano puede generar que el estrés térmico de la población en la ciudad se acentúe notablemente durante estos episodios, desembocando en graves consecuencias para la salud. El estudio de este tipo de impactos debe ser cuantificado mediante índices de confort térmico que establezcan una relación entre las condiciones meteorológicas observadas o previstas por un modelo y la respuesta fisiológica del ser humano, como el *Universal Thermal Climate Index* (UTCI). En este trabajo se realiza un estudio del comportamiento espacio-temporal del UTCI en la ciudad de Valencia durante un periodo de ola de calor (OC) y de no ola de calor (NOC) en agosto de 2023 utilizando el modelo meteorológico mesoescalar (WRF, *Weather Research and Forecasting*). Para ello, se realiza una comparación de las condiciones atmosféricas en la capa límite planetaria (PBL), así como un estudio de la influencia de la temperatura, radiación (a partir de la temperatura media radiante, TMR), intensidad del viento y humedad relativa al comportamiento del UTCI. Los principales resultados muestran una distribución espacial y evolución temporal del UTCI similar para ambos periodos, difiriendo en la magnitud del mismo. La anomalía de temperatura positiva (negativa) respecto al resto del mes es principalmente el factor que provoca un mayor aumento (descenso) de UTCI durante la OC (NOC). Aparece además, una PBL menos desarrollada durante la OC, reflejo de la menor intensidad de la brisa costera en la ciudad durante este periodo, y que también tiene un efecto destacable en el aumento del UTCI durante la OC.

Abstract:

Extreme meteorological events, such as heat waves, are increasingly common during summers in the Mediterranean area. The effect of urban overheating can cause the thermal stress of the population in the city to increase significantly during these episodes, leading to severe health consequences. The analysis of this sort of impact must be quantified through thermal comfort indices that establish a relationship between the meteorological conditions observed or predicted by a model and the physiological response of human beings, such as the Universal Thermal Climate Index (UTCI). This research studies the spatial and temporal behaviour of the UTCI in the city of Valencia during a heat wave (OC) and non-heat wave (NOC) period in August 2023 using the mesoscale meteorological model (WRF, *Weather Research and Forecasting*). For this objective, a comparison of atmospheric conditions in the planetary boundary layer (PBL) is carried out, as well as a study of the influence of temperature, radiation (from the mean radiant temperature, TMR), wind intensity and relative humidity to the behaviour of the UTCI. The principal outcomes show a similar spatial distribution and temporal evolution of the UTCI for both periods, differing in its magnitude. The positive (negative) temperature in comparison with the month considered is principally the main factor which contributes the most to increase (decrease) of UTCI during OC (NOC). Moreover, a less-developed PBL appears during OC, answering to the lower intensity in the costal breeze in the city during this period, which also has a remarkable effect on the increase of UTCI during OC.

Agradecimientos

De ninguna manera este trabajo habría sido posible sin el amparo de mi familia y de mis incondicionales de C.Villalba, que sufren mis cavilaciones y curan mis cicatrices desde que, con una edad temprana, les dije “quiero ser hombre del tiempo”; sin la alegría y apoyo de mis amigos de carrera, que tantísimo echaré de menos ahora que no será a diario; y sin el placer que ha supuesto cursar este máster junto a extraordinarios compañeros: A.J Robles, D.S Muñoz, I.A Rodríguez, V.L Gómez, nos vemos por Casa Manteca.

Tampoco habría sido posible, por supuesto, sin la gran ayuda de mis tutores Beatriz y Alberto, con quienes he compartido tantas reflexiones; ni sin la de Carlos, mi primer profesor de meteorología, siempre dispuesto a solucionar cualquier problema, incluso a deshora. A todos, gracias por darme la oportunidad de adentrarme en este campo, he procurado aprender todo lo que he sido capaz, y así seguiré.

Por último, quería agradecer a AEMET por poner a mi disposición los datos de las estaciones meteorológicas de Valencia utilizadas en este trabajo.

Índice

1. Introducción	1
2. Objetivos	3
3. Caso de estudio	3
3.1. Descripción de la ciudad de Valencia	3
3.2. Contexto meteorológico de agosto de 2023	5
4. Datos y Metodología	6
4.1. Datos de estaciones meteorológicas	6
4.2. Descripción del modelo WRF	7
4.3. Metodología	8
5. Resultados y Discusión	10
5.1. Validación del modelo WRF	10
5.2. Régimen de brisas durante los periodos de interés	12
5.3. Estructura de la PBL	13
5.4. Evolución espacio-temporal del UTCI	15
5.5. Ponderación de contribuciones al UTCI	18
6. Resumen y conclusiones	21
Referencias	22

1. Introducción

La región mediterránea es firmemente considerada por el *Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* (IPCC, por sus siglas en inglés) como una de las zonas más susceptibles de sufrir los impactos derivados del cambio climático (Hilmi et al., 2022). Las tendencias de aumento de temperatura de las últimas décadas no hace sino reafirmarse para escenarios futuros (Ali et al., 2022), acompañadas, además, de fenómenos extremos asociados como las olas de calor. A estos eventos se les identifica generalmente -aunque existen matices en su clasificación- como episodios de al menos tres días consecutivos, en los que como mínimo una décima parte de las estaciones de la región considerada registran temperaturas máximas superiores al percentil 95 de su serie diaria de temperaturas máximas en los meses de julio y agosto del periodo climático de referencia (Cuadrat et al., 2013). Las consecuencias de estos episodios repercuten negativamente de manera inevitable en el desarrollo de actividades económicas, como las referentes al sector agrario; o más significativamente al sector turístico, que en España en general y en la provincia de Valencia en particular, supone cerca del 15 % del producto interior bruto regional (Miró Pérez et al., 2020). La problemática más alarmante, no obstante, consiste en el impacto en la salud de la población, tanto mental como fisiológica, sin perder de vista los estudios de relación entre temperatura y mortalidad existentes (Cuerdo-Vilches et al., 2023); también en concreto para la ciudad de Valencia (Ballester et al., 1997). En esta línea, destaca en el registro histórico la sucesión de olas de calor en Europa en el año 2003, que dejó tasas de exceso de mortalidad superiores a periodos anteriores (D'Ippoliti et al., 2010). En Valencia, dentro del contexto de España donde se registraron temperaturas medias diarias 2.7 °C superiores a la climatología, estos eventos de calor extremo supusieron valores superiores a un 10 % más de mortalidad respecto a la media de los 10 años anteriores (Simón et al., 2005).

El desarrollo demográfico de las últimas décadas concentra esta población en las ciudades (Uhl et al., 2023). Es en estos entornos donde se da el fenómeno de sobrecalentamiento urbano, fruto de la acumulación de calor en los materiales de la ciudad, así como la conocida Isla de Calor Urbana (UHI, por sus siglas en inglés) (Oke, 1995). Esta última consiste en la diferencia de temperatura entre el centro urbano y las zonas periféricas y rurales, con menos o nada de densidad de superficie edificada. Es directamente consecuencia de los cambios del tipo de superficie y de sus características térmicas y ópticas, además de las emisiones de calor debido a las actividades humanas. Dependiendo de la morfología urbana, distribución, materiales de los edificios o medidas de mitigación del estrés térmico que estén adoptadas, esta diferencia puede llegar a superar los 7°C en el caso de Londres (Watkins et al., 2002), o los 8°C en el de Madrid (Yagüe et al., 1991; Ezpeleta et al., 2021), para los episodios más significativos. Para el caso de Valencia, estudios anteriores datan esta diferencia cercana a los 2.5°C (Lehoczky et al., 2017). Esto indica un alto grado de sobrecalentamiento urbano, lo que justifica el estudio de estos episodios para la implementación de medidas de mitigación vista la expansión urbana desde finales del s.XX (Uhl et al., 2023).

Aunque en ciudades con climas predominantemente fríos, el efecto de acumulación de calor en la zona urbana pueda reportar beneficios en cuanto a confort térmico en exteriores, en regiones con climas o estaciones cálidas puede suponer un aumento del riesgo de estrés térmico y de patologías derivadas, así como un inevitable gasto energético extra en sistemas de climatización en aplacar este exceso de temperatura (Stewart and Oke, 2012). En Valencia, según recientes estudios, en invierno el efecto de acumulación de calor en la ciudad ayuda a mejorar el bienestar, mientras que en verano fomenta el estrés térmico (Lehoczky et al., 2017). Por otro lado, el calor liberado por los sistemas de aire acondicionado puede incluso fomentar el efecto de UHI, llegando a suponer 1.5-2°C superiores en zonas altamente urbanizadas como el centro de Madrid (Salamanca et al., 2012), actuando así a modo de retroalimentación positiva. Estos efectos son aún más notables por la noche (Lehoczky

et al., 2017), ya que la pérdida de calor por emisión de radiación de onda larga es más efectiva en los entornos no urbanizados que en la ciudad, donde el calor almacenado durante las horas diurnas encuentra más obstáculos para superar la capa límite urbana. Para el caso de Valencia en concreto, estudios recientes indican que la intensidad de este efecto en las horas nocturnas puede aumentar entre 0.1 y 0.9 °C durante periodos de ola de calor (Wei and Sobrino, 2024). Esta magnitud depende del tipo de zona urbana, también conocido como *Local Climate Zone* (LCZ; clasificación del terreno en 17 tipos de áreas según la estructura de la superficie, cobertura, fracción urbanizada y materiales) propuesta por Stewart and Oke (2012)). Ante situaciones sinópticas favorables a las altas temperaturas por la noche en el periodo estival, el efecto de la ciudad puede provocar que se prolonguen y acentúen episodios de noches tropicales, noches con temperaturas mínimas superiores a 20°C. La frecuencia de este tipo de episodios está aumentando en el litoral mediterráneo, con las consecuencias que acarrea para el bienestar de la población (Ali et al., 2022).

El estudio de olas de calor, el sobrecalentamiento urbano y su impacto en la población, debe estar cuantificado no solo con la temperatura, sino también a partir de índices de confort térmico. Desde que comenzó el interés de estudiar la respuesta orgánica al forzamiento de las variables físicas externas, se han creado innumerables índices que pretendían abarcar esta información. No obstante, el grueso de todos ellos consistía en indicadores que contemplaban simplemente dos variables, como temperatura y humedad. Por ejemplo, Lehoczky et al. (2017) utiliza el *Thermohygrometric Index* (THI) en su estudio sobre la UHI de Valencia; sin embargo, este índice no tiene en cuenta los intercambios radiativos entre el cuerpo y el entorno. Dichos intercambios son esenciales para asociar un estado fisiológico concreto ante un forzamiento externo. Esto, inevitablemente conduce a malinterpretaciones de los valores, pues dichas métricas no cumplen el requisito fundamental de que para cada valor del indicador exista una respuesta fisiológica exclusiva al margen del estrés meteorológico inducido (Jendritzky et al., 2012); además, dificultaría establecer umbrales de riesgo universales para la población. El desarrollo de modelos fisiológicos y de intercambio de calor en el cuerpo humano permitió en los años 80 y 90 del s. XX definir el *Physiological Equivalent Temperature* (PET) (Höppe, 1999)); o el *Standard Effective Temperature* (SET) (Gagge et al., 1986)). Con todo, a pesar de disponer de una razonable representación del equilibrio térmico del cuerpo humano, presentan grandes dependencias ante forzamientos de temperatura, el primero, y de viento, el segundo. Además, su fiabilidad está reducida a un rango de situaciones climáticas, a diferencia del *Universal Thermal Climate Index* (UTCI) que tiene una aplicabilidad más global (Blazejczyk et al., 2012).

Ante la necesidad de una estandarización y generalización de los índices de confort térmico fue estructurada una colaboración interdisciplinar e internacional bajo el marco del programa COST (*Cooperation in Science and Technology*) cuyo objetivo era confeccionar una métrica universal que recogiera todos los avances en la rama de termo-fisiología y que pudiera ser aplicable indistintamente a todo tipo de entornos climáticos. Así, permitiría una homogeneización de los criterios de alerta a la población ante extremos meteorológicos, o de elaboración de planes regionales de actuación y mitigación (Jendritzky et al., 2012). En el UTCI, los flujos de calor sensible, latente, y radiativos, dependen de la temperatura, intensidad del viento, presión de vapor de agua y de la temperatura media radiante (TMR). Teniendo en cuenta la ley de Stefan-Boltzman (ecuación 1), la TMR sería la temperatura resultante de considerar la radiación de onda corta y de onda larga que incide en un sujeto. Es decir, se tiene en cuenta la energía que irradia el sol y la emitida por los cuerpos del alrededor así como por la atmósfera y nubes (ecuación 2) (Martilli et al., 2023):

$$R = \sigma T^4 \quad (1)$$

$$TMR = \sqrt[4]{\frac{SWR + LWR}{\sigma}} \quad (2)$$

donde SWR es el flujo de radiación de onda corta, LWR de onda larga neta, en W/m^2 , y $\sigma = 5,67 * 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}$ es la constante de Stefan-Boltzman. Por otro lado, el UTCI también se parametriza teniendo en cuenta modelos de vestimenta, que contemplan el grado de aislamiento y la resistencia a la evaporación durante un movimiento a una velocidad de 4 km/h (Broede et al., 2013).

Con todo, el UTCI aparece como una temperatura equivalente, en °C, lo que le hace manejable y entendible para la población general. Se interpreta como la temperatura que debería tener el aire en el estado de referencia (i.e. escenario con humedad relativa del 50 %, viento en calma y TMR igual a la temperatura del entorno) para causar la misma respuesta fisiológica en el organismo que la combinación de las variables meteorológicas que se de en el momento de estudio (Broede et al., 2013). Se deriva, entonces, una escala de umbrales de UTCI, con 10 etiquetas (tabla 1).

Tabla 1: Baremos de estrés térmico según el valor en °C del UTCI (Broede et al., 2013).

Estrés térmico	UTCI
Extremo	>46 °C
Muy intenso	38 °C - 46 °C
Intenso	32 °C - 38 °C
Moderado	26 °C - 32 °C
Sin estrés térmico	9 °C - 26 °C

2. Objetivos

Si bien existen investigaciones recientes sobre el sobrecalentamiento urbano y la UHI en la ciudad de Valencia (Lehoczky et al., 2017; Wei and Sobrino, 2024), aún no se han estudiado estos efectos desde el punto de vista del estrés térmico con una métrica universal como el UTCI utilizando un modelo numérico. Por ello, el principal objetivo de este trabajo es:

- Estudiar el comportamiento espacio-temporal del índice de confort UTCI en la ciudad de Valencia durante un periodo de ola de calor (OC) y de no ola de calor (NOC) en agosto de 2023 utilizando un modelo meteorológico mesoescalar (WRF, *Weather Research and Forecasting*).

Con el fin de comparar la variabilidad del UTCI entre ambos periodos se abordan los siguiente objetivos específicos:

- El análisis y comparación de las condiciones atmosféricas en la capa límite planetaria (PBL) entre ambos periodos.
- El estudio de la influencia de las variables temperatura, TMR, intensidad de viento y humedad relativa al comportamiento del UTCI en ambos periodos.

3. Caso de estudio

3.1. Descripción de la ciudad de Valencia

La ciudad de Valencia, con una población superior a los 800.000 habitantes, recoge al 15.9 % de la población de la Comunidad Valencia. Supone, por tanto, el municipio más grande y poblado de la

Comunidad Valenciana y, por tamaño demográfico, la tercera ciudad de España después de Madrid y Barcelona. Situada en la vega baja del río Turia, desembocando en el Golfo de Valencia, su término municipal abarca una extensión total de 138.34 km² (<https://www.valencia.es/val/la-ciutat>). Presenta una densidad de población media de 8.055 hab./km², distribuida en 19 distritos con una amplia variedad de características urbanísticas (figura 1). En cuanto a zonas verdes, se extienden por una superficie de 4.3 km², repartidas entre 2.5 km² de jardines, 0.6 km² de parques y 1.2 km² el curso del cauce del río Turia (Lozano Esteban, 2010). La expansión acelerada del entorno urbano durante el s. XX, provocó la absorción de poblaciones circundantes, haciendo que aparezcan disparidades en las características de las zonas urbanas. Contrastan los distritos del centro, como *Extramurs* o *L'Eixample* con gran densidad urbanizada y de población, frente a zonas como *Pobles del Nord* o *Campanar* donde aún se encuentran entornos campestres comúnmente conocidos como “la huerta” valenciana; relegada de forma vestigial a las afueras de la ciudad tras el desarrollo demográfico (Caselles et al., 1991; Lehoczky et al., 2017). Destaca también como espacio natural, La Albufera, declarado parque natural por la Generalitat de Valencia y que se encuentra al sur de la ciudad extendiéndose por una superficie de 58.8 km², de las cuales 28 km² son de lago y 18.9 km² de marjal y cultivos de arroz.

Valencia presenta tres estaciones meteorológicas de la red de la *Agencia Estatal de Meteorología* (AEMET): Aeropuerto, Viveros y Universidad Politécnica de Valencia (UPV). La estación más cercana a la costa es la de la UPV (círculo en figura 1), emplazada en el campus de la universidad que le da nombre. Cerca de ella, a 1 km del casco antiguo se encuentra Viveros (rombo en figura 1), en las inmediaciones de los Jardines del Real y de una zona ampliamente urbanizada. En cuanto al aeropuerto (triángulo en la figura 1), se sitúa a 10 km del centro de la ciudad. Esta última tiende a registrar temperaturas más altas debido a su lejanía con el mar en comparación con las dos restantes. En todas, los instrumentos están localizados sobre un suelo desnudo, con asfalto alrededor (Lehoczky et al., 2017).



Figura 1: Mapa urbanístico de Valencia con la distribución por distritos (Lehoczky et al., 2017). Marcados con triángulo, rombo y círculo la estación del aeropuerto, Viveros y UPV respectivamente.

En cuanto a la climatología, presenta las características de una ciudad del litoral levantino en el Mediterráneo, con una temperatura media anual suave de 19 °C. Sumado a esto, presenta en general una gran humedad debido a su cercanía al mar y al régimen de brisas propio de esta zona. El malestar térmico generado por la combinación de temperatura y humedad puede ser aliviado por el régimen de vientos costeros (Lozano Esteban, 2010). Estos tienen una predominante componente zonal E-W. La brisa marina diurna de componente este y de una intensidad media en torno a 4

m/s, se alterna con los vientos catabáticos y brisas nocturnas terrales de componente oeste tras la puesta de sol impulsados también por la cercanía de orografía paralela al litoral. Estas diferentes circulaciones pueden modificar la extensión e intensidad de la acumulación de calor en el entorno urbano, y en consecuencia, la sensación de confort térmico (Cueva, 2001).

La expansión urbanística indudablemente frena el avance de la brisa, además de provocar que adquiera temperatura a su paso y la advecite a los barrios más interiores. El imperante desarrollo denso e intrincado de Valencia no favorece el fomento de confort térmico por el efecto de la brisa, sobre todo con la ampliación hacia el cuadrante sureste, que sirve como tapón en el transcurso hacia las zonas centrales y del noroeste, las regiones potencialmente con menos bienestar térmico (Lozano Esteban, 2010).

3.2. Contexto meteorológico de agosto de 2023

En el conjunto nacional, el mes de agosto de 2023 es clasificado por la AEMET (AEMET, 2023) como muy cálido, con una temperatura media de 24.8 °C en el territorio peninsular. La Comunidad Valenciana, por su parte, superó este promedio, llegando hasta los 26 °C, que suponen 1.6 °C más respecto al periodo climatológico de referencia 1991-2020. Se erige como el segundo mes con un registro de temperaturas tan alto en esta comunidad, después del agosto del año 2012. La entrada de aire frío propiciado por una vaguada a partir del día 26, que dejó temperaturas más bajas de lo normal para la época del año, no pudieron aplacar en promedio los elevados registros de las semanas anteriores. La ciudad de Valencia, en el litoral de esta comunidad, siguió la misma estela.

Durante este mes, España experimentó dos olas de calor: entre el día 6 y 13, y entre el 18 y 25. En Valencia se reflejaron los efectos de las mismas. En la figura (2a), se muestran las temperaturas máximas diarias en las tres estaciones durante el mes de agosto de 2023 así como los percentiles 95 de temperaturas máximas diarias para las estaciones del aeropuerto y de Viveros, para el periodo 1991-2020. Estos son 35.0°C y 34.0°C respectivamente. Los mencionados percentiles, se superan los días 2 y 10 para todas las estaciones, y los días comprendidos entre el 21 al 25 para el caso del aeropuerto, ambos inclusivos; y del 21 al 24, en Viveros. Esto es indicativo de las elevadas temperaturas máximas que se dieron durante este mes. Destaca el día 10, cuando se batió el récord de toda la serie de temperaturas máximas, alcanzando los 46.8 °C en el aeropuerto, 3.4 °C superior al antiguo registro, y los 44.5 °C en Viveros. Estos conforman un pico momentáneo de temperatura, cerca de las 14 UTC (*Coordinated Universal Time*, dos horas más que la hora local en Valencia en horario de verano), provocado por la entrada repentina de un intenso viento de poniente (viento de componente oeste, del interior, y seco). Con el predominio siguiente de brisa marina, se aplacó este aumento repentino y se retornó a valores que, aunque elevados, son más propios para un periodo estival en esta región. No obstante, este no fue un evento local de la ciudad de Valencia, sino que se elevaron por encima de los 40 °C las temperaturas en más de la mitad del territorio de la Comunidad Valenciana fruto de esta direccionalidad del viento.

Respecto a los periodos nocturnos, durante todo el mes de agosto mayoritariamente se superó el umbral de noche tropical, temperatura mínima superior a 20°C (figura 2b). En el aeropuerto, tan solo el 5, el 6 y del 28 en adelante se quedaron al margen de esta clasificación. En la ciudad, en Viveros y en la UPV, exclusivamente el 27, 28, y el 31. Un mes por lo general, muy caluroso en las horas de conciliación del sueño.

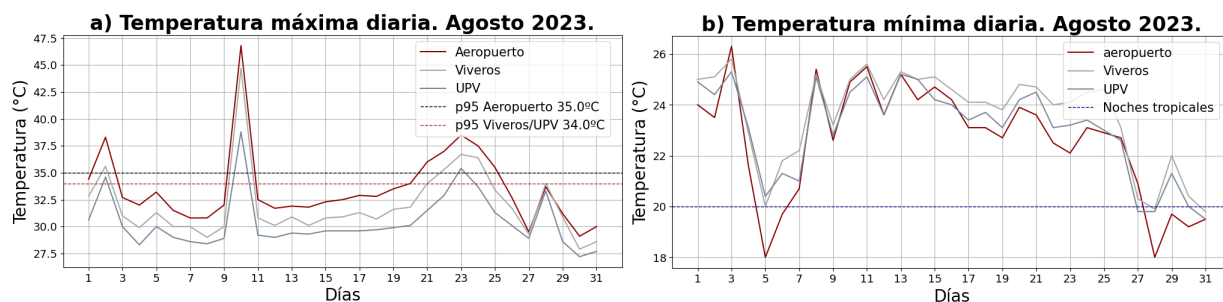


Figura 2: Temperaturas máximas (a) y mínimas (b) durante el mes de agosto de 2023 en las estaciones de Aeropuerto, Viveros y UPV, en Valencia. En líneas horizontales marcados los percentiles 95 (a); y el umbral de noches tropicales (b).

En cuanto al viento, durante la mayor parte del mes de agosto se reproduce el régimen de brisas característico de esta zona. Aparecen dos direcciones predominantes (figura 3): vientos de componente este, diurnos y con máxima intensidad en las horas centrales del día correspondientes a la brisa marina; y vientos de componente oeste, nocturnos y de menor intensidad correspondientes a la brisa nocturna.

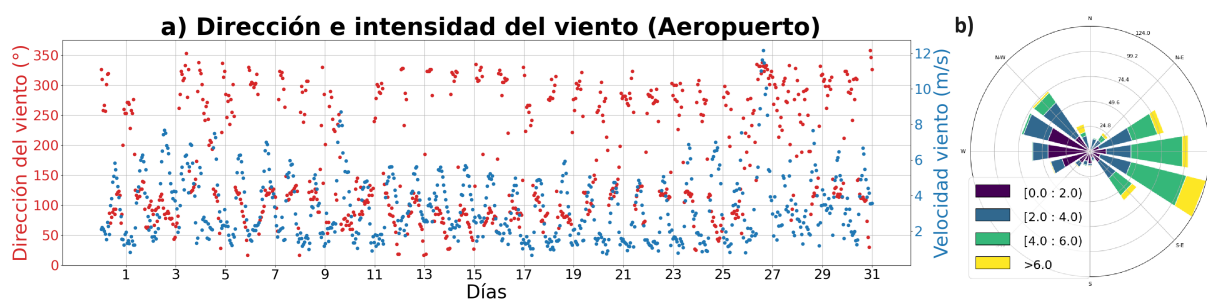


Figura 3: a) serie temporal de dirección (en rojo) e intensidad (en azul) de viento en la estación del Aeropuerto durante el mes de agosto de 2023. b) representación en formato rosa de viento de estas magnitudes.

En lo que respecta a las precipitaciones, fue un mes sin apenas días de lluvia. Estos se concentraron en las tormentas de corta duración del día 26 y la madrugada del día 27, por la mencionada entrada de aire frío en altura. En Valencia se registraron en torno a 20 mm.

4. Datos y Metodología

4.1. Datos de estaciones meteorológicas

Los datos de las estaciones de la red de AEMET (<https://www.aemet.es/es/>): Aeropuerto, Viveros y UPV, se utilizan para caracterizar las condiciones meteorológicas del mes agosto de 2023 en Valencia y evaluar los resultados de la simulación con el modelo WRF. Se utilizan datos diezminutales de temperatura y humedad relativa a 2 m, e intensidad y dirección del viento a 10 m. Entre ellas, solamente Aeropuerto y Viveros tienen series suficientemente largas como para poder calcular los umbrales pertinentes para la determinación de periodos de ola de calor en la ciudad. Se calculan los percentiles 95 de las series de temperaturas máximas diarias para los meses de julio y agosto en el periodo climatológico 1991-2020 (Cuadrat et al., 2013). Estas series más extensas son obtenidas de la base de datos *European Climate Assessment Dataset* (ECAD, <https://www.ecad.eu/dailydata/predefinedseries.php#>).

Tabla 2: Coordenadas geográficas de las tres estaciones de AEMET en Valencia. Especificado el código de referencia en esta base de datos. Percentiles 95 (P95) de temperaturas máximas diarias en julio y agosto en el periodo 1991-2020. Indicadas también la fracción urbanizada (Urb. frac), la cobertura de vegetación (Veg. frac) y la LCZ en la clasificación de (Stewart and Oke, 2012), según el modelo WRF. * No existe serie suficientemente larga para establecer percentil.

Estaciones	Ref. AEMET	Lat	Lon	Altitud (m)	P95 (°C)	Urb. frac (%)	Veg. frac (%)	LCZ
Aeropuerto	8414A	39°29'06"	00°28'29"	56	35	0	30.9	E
Viveros	8416X	39°28'50"	00°21'59"	11	34	82.0	21.3	6
UPV	8416Y	39°28'47"	00°20'13"	6	*	85.6	17.3	5

4.2. Descripción del modelo WRF

En este trabajo se utiliza el modelo WRF, versión 4.5 (Skamarock et al., 2019). Es un modelo mesoescalar no hidrostático, con integración por diferencias finitas adelantadas. Posee una coordenada vertical tipo sigma, que sigue las irregularidades del terreno y una malla tipo de C de Arakawa (Arakawa, 1977).

Son utilizados 3 dominios anidados, con resoluciones de 9 km, 3 km y 1 km centrados en la ciudad de Valencia (figura 4). Como condiciones de contorno se han utilizado los datos del reanálisis del ERA5 del *European Center for Medium Range Weather Forecast* (ECMWF, <https://www.ecmwf.int/>). Los cálculos del modelo se realizan con un paso de tiempo de 27 segundos, con una actualización de las condiciones de contorno cada 6 horas, abarcando desde el 1 de agosto de 2023 hasta el 31 del mismo mes, y en un total de 45 niveles verticales. La resolución en la vertical es gradual, con incrementos de 5 metros durante los primeros niveles que van aumentando conforme se alcanzan estratos más elevados. La capa más alta supera los 20 km. La gran parte de los niveles, 28, se encuentran en el primer kilómetro, escala típica de la capa límite planetaria, que es donde reside el interés en este trabajo.

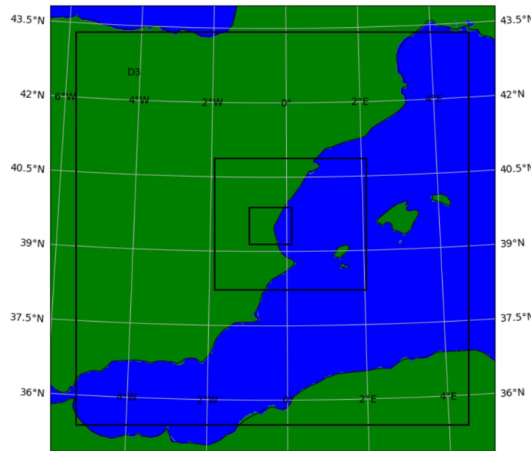


Figura 4: Dominios anidados utilizados en la simulación de WRF.

En cuanto a las parametrizaciones utilizadas (tabla 3), para resolver la turbulencia en la capa límite se utiliza el esquema de Bougeault-Lacarrère, el cual permite el cálculo de la energía cinética

turbulenta (TKE) (ecuación 3).

$$\frac{d(TKE)}{dt} = S + B - D + T \quad (3)$$

S corresponde a la producción de cizalla; B , es el término de flotabilidad; D , el término de disipación viscosa, y T el de transporte de energía. La capa superficial de la PBL está regida por las teorías de semejanza de Monin Obukhov (Jiménez et al., 2012), y en cuanto a la física del suelo, viene determinada por el modelo superficial *Noah Land Surface Model: Unified NCEP/NCAR/AFWA* con temperatura y humedad en cuatro niveles. Por otro lado, como representación de la física urbana, se utiliza el esquema multicapa *Building Effect Parametrization* y *Building Energy Model*, BEP-BEM (Martilli et al., 2002; Salamanca et al., 2012), que tiene en cuenta la morfología de los edificios y por lo tanto, resuelve los intercambios de calor y momento entre los edificios y la atmósfera. También incluye una parametrización para modelizar el aporte de calor antropogénico debido a los sistemas de aires acondicionados. La descripción de la ciudad de Valencia en relación a la estructura, cobertura y fracción urbanizada del terreno en cada punto, LCZ, se hace mediante datos del *World Urban Database and Access Portal Tools* (WUDAPT) Demuzere et al. (2021). Además, se calcula el índice de confort térmico UTCI en puntos urbanos del dominio, mediante el último desarrollo incorporado al modelo WRF-Comfort (Martilli et al., 2023). En dichos puntos se obtienen 54 valores de UTCI. Los resultados de WRF proporcionan los valores que se encuentran en el percentil 10, 50 y 90 del conjunto de estos valores. En este trabajo se ha analizado este último percentil, por ser el que presenta mayores riesgos potenciales para la salud. Se referirá a él como UTCI de aquí en adelante.

Tabla 3: Parametrizaciones destacadas utilizadas en las simulaciones con WRF y sus referencias.

Parametrización física	Referencia
Radiación de onda corta	(Dudhia, 1989)
Radiación de onda larga	(Mlawer et al., 1997)
Esquema de PBL	(Bougeault and Lacarrere, 1989)
Capa superficial PBL	(Jiménez et al., 2012)
Superficie terrestre (LSM)	(Chen and Dudhia, 2001)
Parametrización urbana	(Martilli et al., 2002; Salamanca et al., 2010)
UTCI	(Martilli et al., 2023)
Local Climate Zones (LCZ)	(Demuzere et al., 2021)

La validación se ha efectuado comparando las variables meteorológicas de temperatura, intensidad y dirección del viento de las estaciones de Aeropuerto, Viveros y UPV y los correspondientes puntos en el dominio de WRF. Los datos proporcionados por el modelo son horarios, por lo que hay que promediar los datos diezminutales de AEMET para poder efectuar la validación. Además, debido a la malla tipo C de Arakawa, el viento está definido a media altura de cada celda vertical. Para calcular el viento a 10 metros y poder compararlo con el de las medidas experimentales, se ha hecho un ajuste entre los dos niveles inmediatamente anterior y posterior a dicha altura.

4.3. Metodología

De cara a cumplimentar los objetivos propuestos en el trabajo, primeramente se definen los periodos de OC y NOC de interés. El primero se fija entre los días 21 y 24 de agosto, ambos inclusive, en base a la información de los percentiles 95 de las temperaturas máximas (figura 2). El segundo, dado que el agosto de 2023 fue un mes con imperantes condiciones estables, se utiliza un

criterio en base a la evolución del UTCI. Se escoge el periodo del 4 al 7 de agosto, por ser el único en no alcanzar la categoría de “estrés térmico muy intenso” en la estación de Viveros (figura 5). Del día 26 en adelante no se considera debido a la ocurrencia de precipitaciones, que modifican las condiciones de estudio. Asimismo, el día 1 también se deja al margen, por presentar un valor espurio irreal, seguramente debido a la inicialización del modelo.

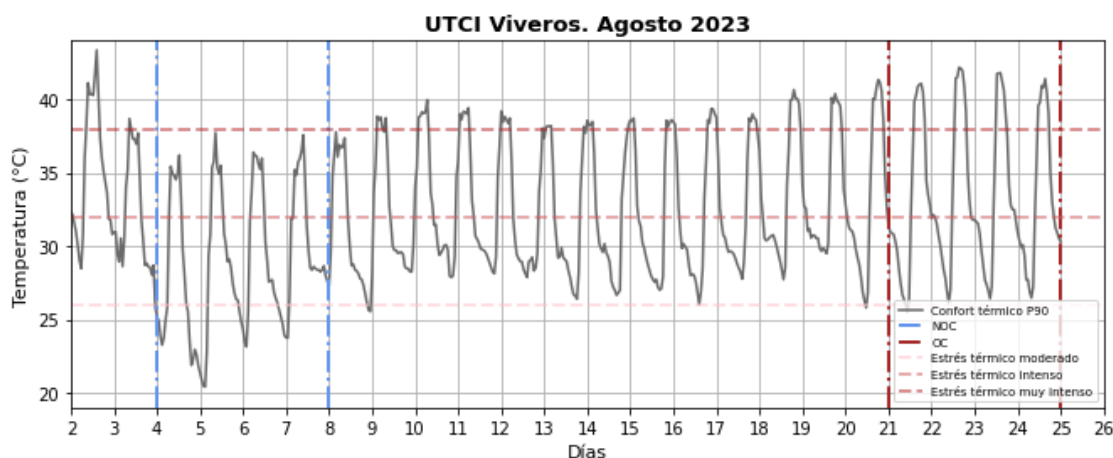


Figura 5: Evolución del UTCI P90 en el punto del dominio de WRF correspondiente a Viveros. Del 2 al 25 de agosto. En líneas horizontales umbrales del UTCI.

Una vez definidos los periodos de OC y NOC se hace una comparación de las condiciones meteorológicas entre ambos, especialmente en relación con el comportamiento del viento y el régimen de brisas en superficie. Asimismo, en búsqueda de la caracterización vertical de la atmósfera, se hace un análisis de la estructura de la PBL mediante perfiles donde se muestra la evolución diaria en la vertical de la temperatura potencial, intensidad de viento y TKE que proporciona WRF en ambos periodos de interés.

Posteriormente, con el objetivo de estudiar el comportamiento espacio-temporal del UTCI y la influencia de las variables de las que depende (temperatura, TMR, intensidad de viento y humedad relativa), se representan, primero, los ciclos diarios de cada magnitud de interés durante sendos periodos. Seguidamente, se analiza mediante mapas de sombreados y contornos la distribución espacial en distintos momentos del día de las magnitudes anteriormente referidas.

Por último, de cara a cuantificar la correlación e influencia de la temperatura, TMR, intensidad del viento y humedad relativa al UTCI, se efectúan mapas de regresión entre el UTCI y cada variable. Para ello, se construyen índices de cada magnitud en cada punto urbano del dominio para el periodo del 2 al 25 de agosto con datos horarios: para el UTCI, calculando su anomalía horaria; para el resto de magnitudes, se calcula la anomalía horaria, y posteriormente se estandariza dividiendo entre su desviación típica (anomalía estandarizada) para homogeneizar unidades entre las distintas magnitudes de cara a su ulterior comparación. Con ello, se calcula el coeficiente de regresión con unidades de °C de UTCI por desviación estándar de la variable en cuestión en cada punto del dominio (Wilks, 2011). Por otro lado, se calcula, de nuevo en cada discretización del dominio urbano, un promedio de la anomalía estandarizada de la temperatura, TMR, intensidad del viento y humedad relativa, en los periodos de OC y NOC. Este valor multiplicado por el coeficiente de regresión resulta en el incremento en °C de UTCI que suponen dichas anomalías promedio en cada punto durante OC y NOC respectivamente, asumiendo tanto las variables como

sus efectos en el UTCI lineales e independientes. En cuanto a la significación estadística, se emplea un *t-test* con un nivel de confianza del 95% sobre el *p-value* de la correlación, utilizando como hipótesis nula, H_0 , que ambos índices están totalmente no correlacionados (García et al., 2009).

5. Resultados y Discusión

5.1. Validación del modelo WRF

Con el objetivo de poder considerar las simulaciones del modelo como buena aproximación a la realidad, es pertinente realizar un proceso de validación de las salidas de los cálculos efectuados por WRF. La forma de cuantificar esto es comúnmente mediante parámetros estadísticos que comparan la proximidad y similitud de las series observadas y las modelizadas. Los parámetros estadísticos utilizados son el *Root Mean Square Error* (RMSE), el *Mean Bias Error* (MBE), el *Mean Absolute Error* (MAE) y el *Coefficiente de correlación de Pearson* ($\hat{\rho}$). Sus expresiones matemáticas son las siguientes, donde x_i hace referencia a los datos del modelo e y_i a los datos de las observaciones de estaciones meteorológicas, en ambos casos horarios. N es el número de horas.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2} \quad (4)$$

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i) \quad (5)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i - y_i| \quad (6)$$

$$\hat{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

El RMSE proporciona una medida de la desviación típica de la varianza entre el modelo y las observaciones; el MBE, de cuánto sobrestima o infravalora de media el valor de la variable modelizada frente a las observaciones; el MAE, sobre cómo se acumula esa disparidad en la estimación; y $\hat{\rho}$, de cuál es la correlación entre las series, es decir, si varían simultáneamente. La tabla (4) muestra estos parámetros para los puntos de las tres estaciones de la AEMET.

Tabla 4: Parámetros estadísticos de validación entre los datos de temperatura y velocidad de viento de las estaciones de AEMET del Aeropuerto, Viveros y UPV y los puntos del dominio equivalentes en la simulación de WRF. Periodo completo del 2 al 25 de agosto, OC y NOC. Parámetro $\hat{\rho}$ es adimensional.

Estación	Variable	Periodo (2-25)				OC				NOC			
		RMSE	MBE	MAE	$\hat{\rho}$	RMSE	MBE	MAE	$\hat{\rho}$	RMSE	MBE	MAE	$\hat{\rho}$
Aeropuerto	Temperatura (°C)	1.63	-0.69	1.17	0.93	1.11	0.09	0.93	0.98	1.27	-0.72	1.04	0.94
	Viento (m/s)	1.46	-1.04	1.15	0.82	0.89	-0.60	0.71	0.92	1.67	-1.10	1.26	0.91
Viveros	Temperatura (°C)	1.66	0.94	1.29	0.89	2.34	1.92	1.98	0.92	1.36	0.84	1.08	0.90
	Viento (m/s)	0.61	0.05	0.45	0.74	0.35	0.04	0.28	0.91	0.77	0.12	0.55	0.74
UPV	Temperatura (°C)	1.60	0.83	1.20	0.90	2.50	2.23	2.27	0.91	1.62	0.89	1.23	0.89
	Viento (m/s)	1.43	1.20	1.22	0.86	1.13	0.94	0.94	0.85	1.05	0.70	0.85	0.92

Destaca el cambio de signo entre el MBE del aeropuerto y las otras dos estaciones tanto para la temperatura como para la intensidad del viento. En este primero el modelo subestima los valores mientras que en los otros enclaves los sobrestima. Hay que tener en cuenta la localización de las tres estaciones: fuera del casco urbano (aeropuerto) y dentro de la ciudad (Viveros y UP). Respecto al viento, la morfología urbana real juega un papel importante en la obstaculización del viento en la ciudad. La sobrestimación de la intensidad de viento en la zona urbana puede ser debida a que el modelo no es capaz de reproducir suficientemente bien este efecto. Respecto a la sobrestimación de la temperatura en Viveros y UPV podría ser debida a la sobrevaloración del calentamiento urbano. Reside aquí, entonces, la importancia de la correcta determinación de las características urbanas que definen la parametrización en la ciudad con el fin de obtener una simulación más fiel a la realidad.

No obstante, por lo general el modelo reproduce la señal observada (figura 6). Se aprecia el sesgo, sin embargo, especialmente en las temperaturas mínimas en el periodo OC, acorde con la sobrestimación de la acumulación de calor en la ciudad, en este caso durante las horas nocturnas. Destaca, por otro lado, el pico sobresaliente de temperatura registrada del día 10, muestra del extraordinario evento cálido que dejó temperaturas de récord, y que al deberse a un cambio repentino de la dirección del viento en espacio de tiempo reducido WRF no es capaz de resolver bien.

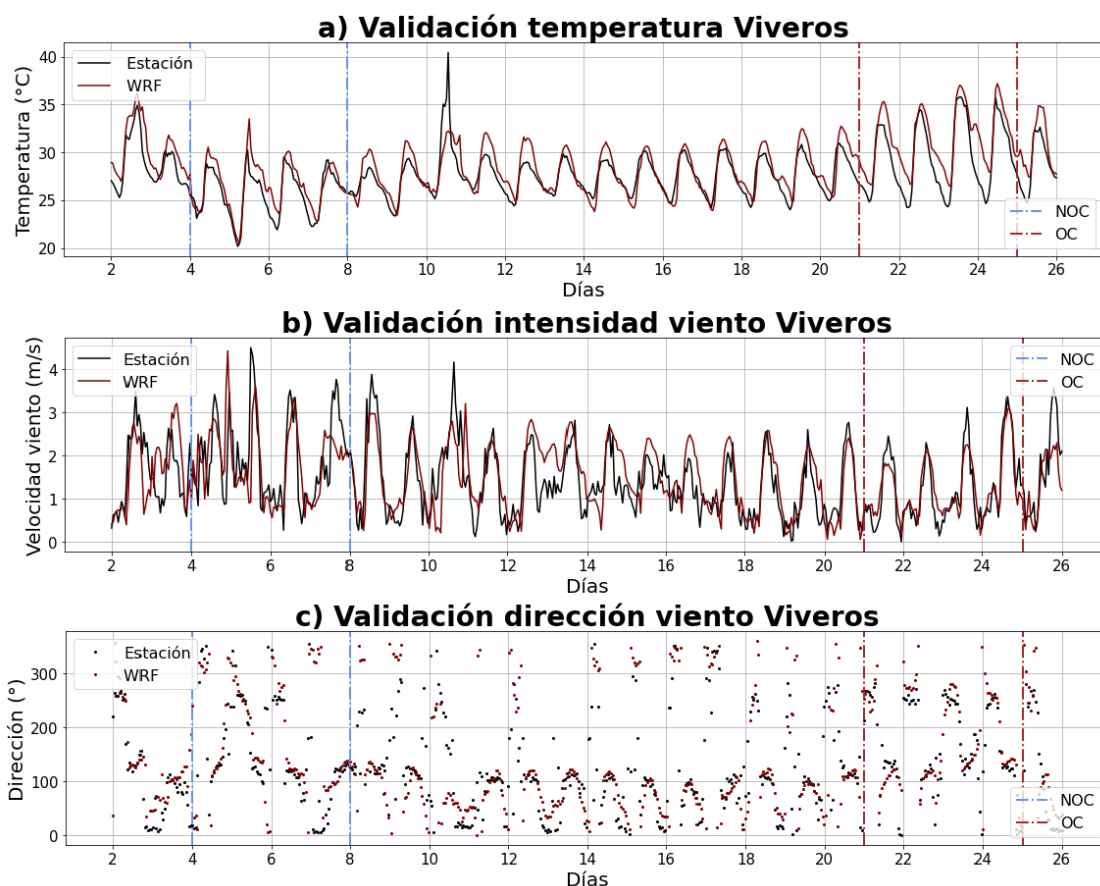


Figura 6: Validación del modelo en el punto del dominio correspondiente a Viveros para las variables de temperatura (a) e intensidad (b) y dirección de viento (c), del 2 al 25 de agosto. En líneas verticales marcados los periodos de NOC (azul) y OC (rojo) de interés.

5.2. Régimen de brisas durante los periodos de interés

Como se introducía previamente, la intensidad del viento es uno de los factores de los que depende el índice UTCI. Reduce la sensación de calor favoreciendo la transpiración al remover el aire cálido inmediatamente próximo a la interfaz corporal. Especial interés tiene el estudio de este efecto en un enclave donde se suceden episodios de brisas marinas como es la ciudad de Valencia. Con este objetivo se procede al estudio del comportamiento del viento durante los periodos de interés, OC y NOC.

En ambas ventanas temporales, OC y NOC, se mantiene el patrón de dirección de viento (figura 7 c y d) provocado por el régimen de brisas. A pesar de que Viveros esté situada en una zona céntrica de la ciudad, próxima a barreras de edificios que pudieran interferir en el registro, se refleja considerablemente bien este comportamiento del viento: al flujo nocturno débil de componente oeste-noroeste le sucede, a media mañana con el efecto del calentamiento solar en la superficie terrestre, la entrada de vientos del este provenientes del mar. Se alcanza la máxima intensidad sobre las 14 UTC en ambos casos, que, además, favorece la disminución de temperatura.

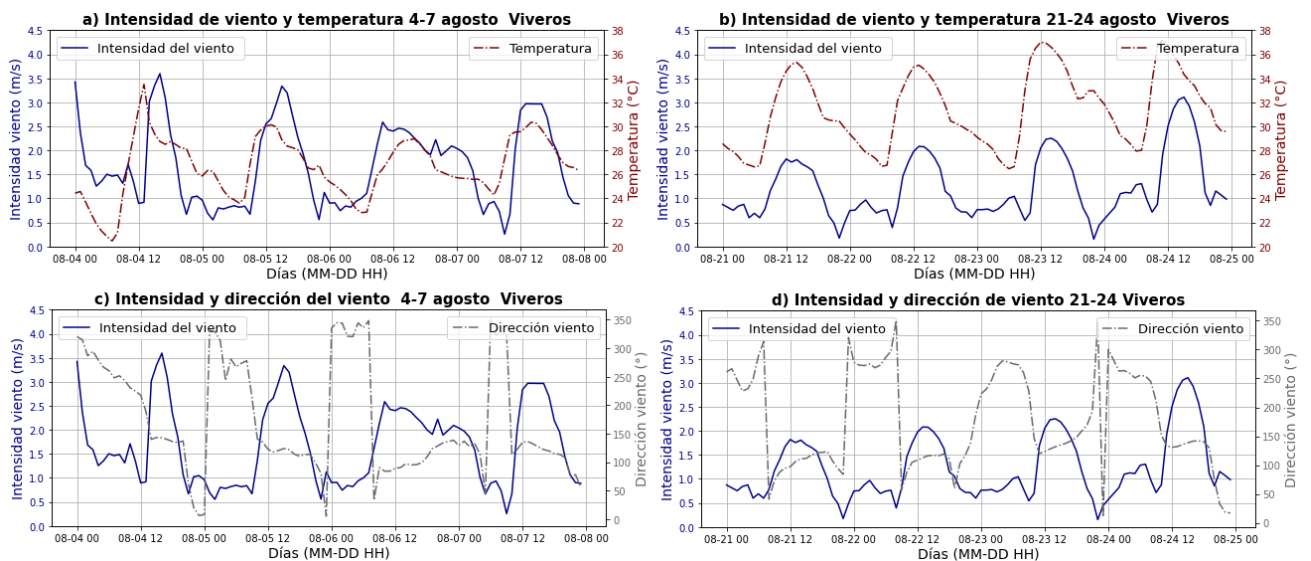


Figura 7: Intensidad de viento y temperatura en el periodo de NOC (a) y OC (b). Intensidad y dirección del viento para los mismo periodos (c y d, respectivamente). Resultados en el punto del dominio de WRF correspondiente a Viveros.

Las diferencias entre ambos periodos se encuentran -más allá de en la temperatura, evidente por la definición de los mismos- fundamentalmente en el módulo de la brisa, con valores predominantemente más elevados para el periodo de NOC. La direccionalidad es similar, con alternancias entre las mismas componentes de viento sucesivamente. No obstante, aparecen leves diferencias en cuanto a la hora de entrada y salida de las brisas. Por ejemplo, en los días 22 y 23 (OC) la salida es más prematura que en los días 5 y 6 (NOC).

Uno de los factores necesarios para el desarrollo de este fenómeno de mesoescala es el contraste térmico entre tierra y mar. Existe una diferencia de hasta 2°C en la temperatura del mar entre el periodo de OC y NOC, siendo mayor durante OC. Sin embargo, el contraste térmico teniendo en cuenta las horas diurnas de máxima temperatura, cuando las brisas son más intensas, sigue siendo mayor para OC. Si bien a priori esto no concuerda con que se den brisas más leves durante OC, en relación con estudios como (Román-Cascón et al., 2022), no es único el requisito de gradiente

térmico tierra-mar para la intensificación de la brisa, sino también que exista una PBL en la zona costera que permita el intercambio de momento en la vertical y se pueda favorecer la entrada del viento.

5.3. Estructura de la PBL

Con el objetivo de continuar con la caracterización de las condiciones atmosféricas en ambos periodos, se procede ahora al análisis de la estructura vertical de la PBL. Se analiza, entonces, la evolución diaria de los perfiles verticales de temperatura potencial, intensidad de viento y energía cinética turbulenta modelizados, para los días 6 y 23, correspondientes a los periodos NOC y OC respectivamente.

Primeramente, para estudiar la estabilidad estática de la PBL, se utiliza la temperatura potencial (figura 8), pues su pendiente en el perfil vertical proporciona información clara sobre la estratificación atmosférica.

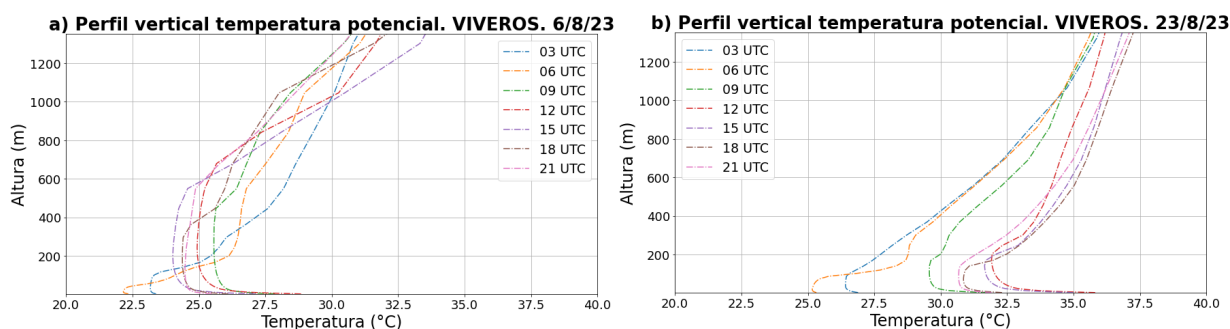


Figura 8: Perfil vertical de temperatura potencial desde 0 a 1350 metros de altura en el punto del dominio de WRF correspondiente a la estación de Viveros. En colores, los intervalos de horas UTC. a) para el día 6 de agosto. b) para el día 23 de agosto.

Destaca la diferencia de temperatura entre un periodo y otro, superior a $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en las horas centrales, tanto en superficie como en altura. Coinciden ambos casos en la pequeña capa inestable cerca de la superficie, dada por el perfil negativo de temperatura potencial. Esto ocurre para todas las franjas horarias en ambas ventanas temporales, lo que indica la gran acumulación de calor en el suelo urbano, aún incluso durante las horas nocturnas. El enfriamiento radiativo nocturno de la superficie es compensado por el flujo de suelo debido al almacenamiento de calor durante las horas diurnas y que, unido a la advección de aire más frío de zonas no urbanas, provoca que se mantenga la capa inestable cerca de la superficie por la noche. La similitud en el perfil para ambos días continúa en la rápida transición hacia la estabilidad neutral (i.e. sin cambio de temperatura potencial con la altura), que indica la extensión de la capa mezclada. Sin embargo, en el caso del día 23 rápidamente cambia a un perfil estable, en torno a los 200 metros, que indica el límite de la PBL. En el caso del día 6, el perfil neutral se extiende mucho más en la vertical, no siendo hasta cerca de los 800 metros cuando se llega al extremo superior de la PBL. Estas diferencias de altura se deben a que las altas temperaturas en capas más altas durante OC hacen disminuir el flujo de calor sensible inhibiendo el desarrollo de la PBL, frente al caso de NOC.

Por otro lado, al margen de efectos térmicos, otro factor capaz de generar turbulencia e inestabilidad en la capa límite es el viento (figura 9). En concreto, el intercambio de momento entre capas está relacionado con la variación de la intensidad del viento con la altura, la cizalla.

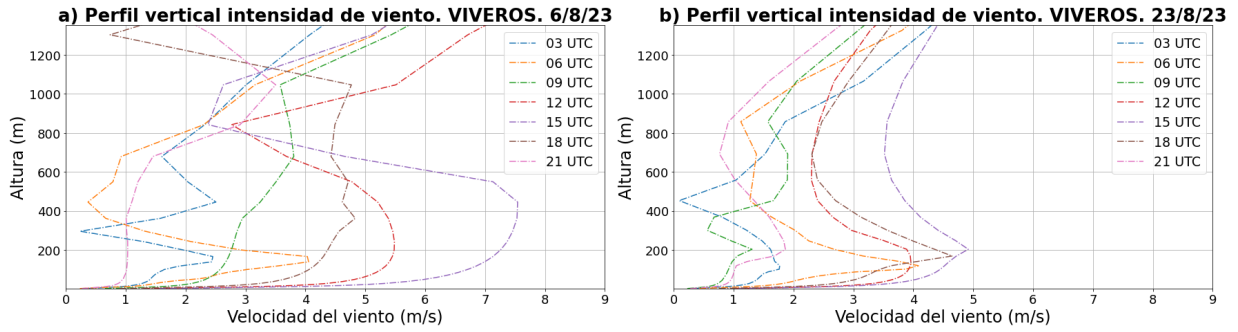


Figura 9: Perfil vertical de intensidad de viento desde 0 a 1350 metros de altura en el punto del dominio de WRF correspondiente a la estación de Viveros. En colores, los intervalos de horas UTC. a) para el día 6 de agosto. b) para el día 23 de agosto.

Se aprecia que la intensidad del viento es más elevada en las capas más cercanas a la superficie, para cualquier franja horaria, el día 6 que el 23. Los máximos aparecen sobre los 200 metros para OC, mientras que esta altura es en torno a 400 metros para NOC. Se alcanzan durante las horas centrales del día y en la transición hacia la tarde, coincidiendo cuando el calentamiento por radiación solar ha favorecido la adquisición de flotabilidad por las parcelas de aire inmediatas a la superficie y el intercambio de momento con capas más altas; además de la entrada de la brisa marina, que se favorece si hay intercambio de flujo entre capas verticales en la ciudad (Román-Cascón et al., 2022). Por otro lado, la cizalla vertical parece ser más acentuada en este primer día, lo que favorece la mezcla turbulenta por intercambio de momento, la ventilación de la capa superficial y el aumento de la altura de la capa límite. Esto se puede observar con los perfiles verticales de TKE (figura 10).

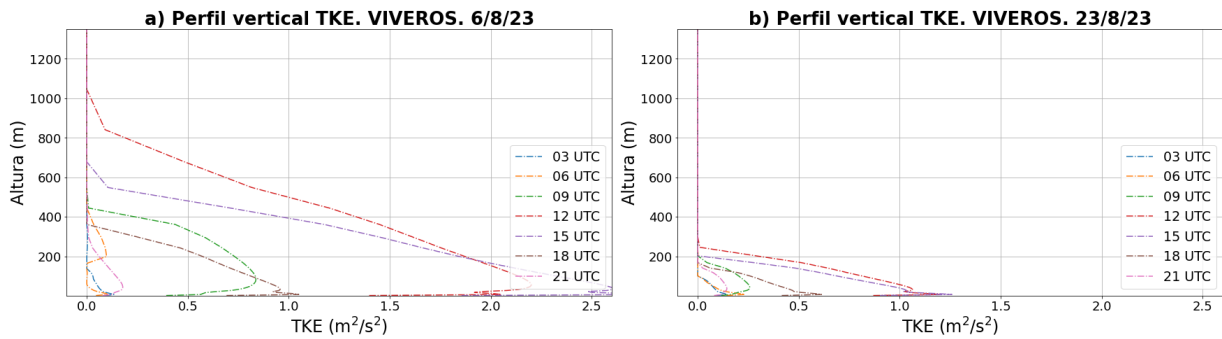


Figura 10: Perfil vertical de TKE desde 0 a 1350 metros de altura en el punto de malla de WRF correspondiente a la estación de Viveros. En colores, los intervalos de horas UTC. a) para el día 6 de agosto. b) para el día 23 de agosto.

La TKE se hace prácticamente cero por encima de la capa de mezcla, es decir, coincidiendo cuando el perfil de temperatura potencial es estable (aumenta con la altura en la figura 8). En la línea de lo comentado en referencia a las dos figuras anteriores (8 y 9), aquí, los valores de energía turbulenta son mayores para el primer día. Más aún, esta permanece limitada a la capa inmediatamente próxima a la superficie para el día 23, mientras que el día 6 se extiende mucho más en la vertical. La altura más baja de la capa de mezcla durante la OC puede ser consecuencia directa de la reducción de flujo de calor sensible. A pesar de que la superficie del suelo adquiera más temperatura, la temperatura en toda la columna de la PBL también es elevada, lo que puede reducir el gradiente térmico vertical y no permitir este intercambio de calor sensible. Esto inhibe el transporte vertical del calor acumulado en la superficie durante este periodo, que a su vez fomenta el aumento de temperatura cerca de la superficie.

5.4. Evolución espacio-temporal del UTCI

En esta sección se analiza la evolución temporal así como la distribución espacial del UTCI durante los periodos de OC y NOC. Dicha caracterización se realiza paralelamente al análisis del comportamiento, en las mismas franjas temporales, de las variables de las que depende: temperatura, TMR, intensidad de viento y humedad relativa. Para ello, se estudia el ciclo diario tanto del UTCI, como del resto de magnitudes (figura 11). La representación en *boxplots* para todos los puntos urbanos del dominio en cada periodo permite observar la variabilidad que existe en la ciudad.

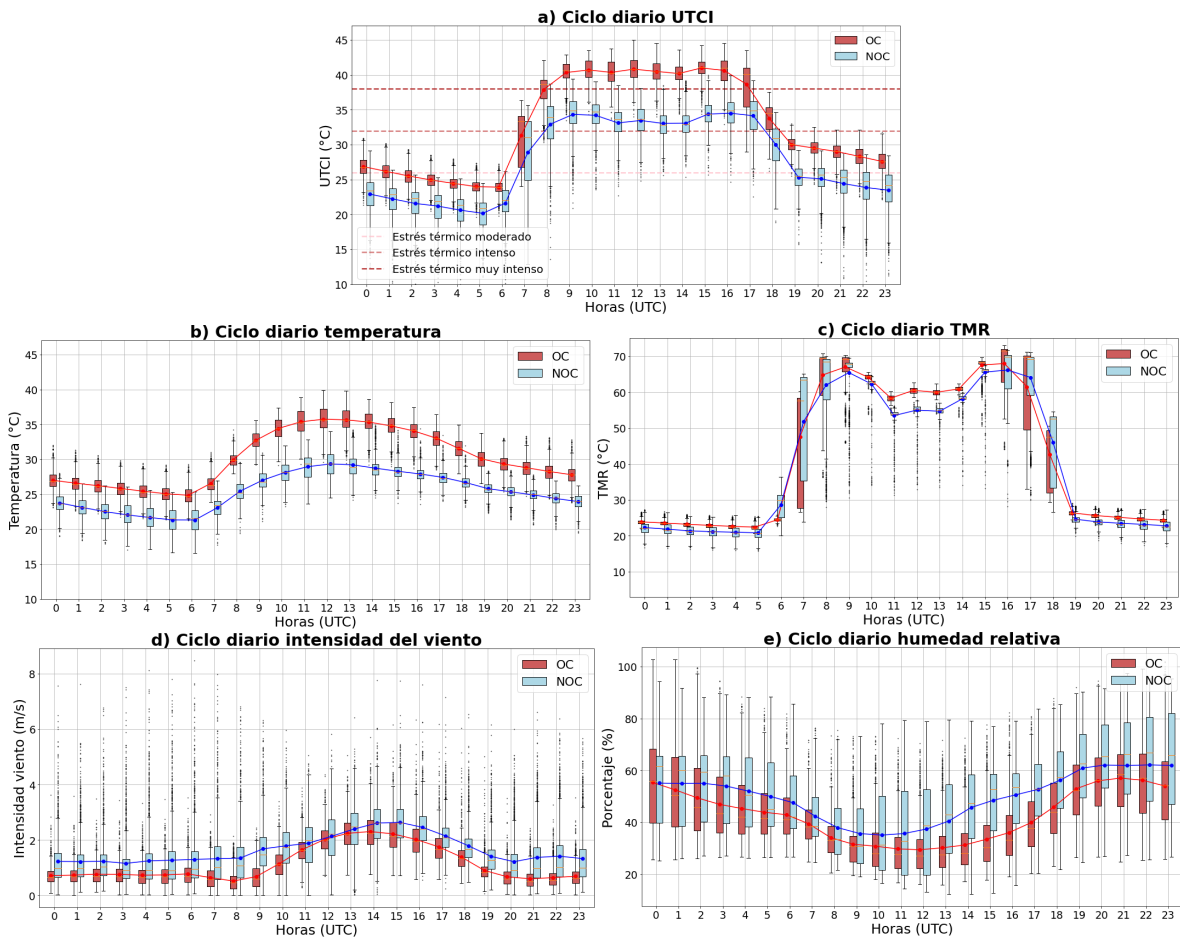


Figura 11: Ciclo diario de UTCI (a), temperatura (b), TMR (c), intensidad del viento (d) y humedad relativa (e). *Boxplots* con todos los datos del dominio urbano. En azul para el periodo NOC y en rojo para OC. Las líneas azul y roja representan la media horaria.

La temperatura muestra una evolución típica de días despejados y de estabilidad, con máximos pasado el mediodía y mínimos en la transición noche-día (5-6 UTC). Existe cierta dispersión en los datos, con valores extendiéndose entre los 30 y 40 °C en las horas centrales durante OC; y entre 25 y 35 °C en NOC. Destacan las medias siempre por encima de los 20 °C, con apenas algunos valores minoritarios por debajo. Se aprecia de nuevo, entonces, la persistencia de noches tropicales. La TMR presenta aún mayor dispersión en los valores durante las horas diurnas. Esto se debe a la heterogeneidad de la ciudad en relación al grado de incidencia de la radiación solar en cada zona. La TMR diferirá mucho de una zona iluminada a una zona de sombra debido a la morfología de los edificios. Por ello, esta dispersión en los datos se manifiesta más en las horas posteriores al amanecer y previas al atardecer, cuando el ángulo cenital es grande. Durante las horas centrales,

la distribución es más homogénea, existe menos diferencia entre puntos de la ciudad. La TMR en ambos periodos, OC y NOC, es muy similar en magnitud. Destacan dos momentos, posterior al amanecer y previo al anochecer respectivamente, cuando los valores de la distribución de la TMR durante NOC superan ligeramente a los de OC. La diferencia en la duración del día entre ambos periodos -20 minutos de desfase tanto en la salida como puesta del sol en NOC frente a OC- podría ser una explicación.

En cuanto a la intensidad del viento y la humedad relativa, ambas aparecen más elevadas para el periodo de NOC. La primera, en la línea de lo comentado en la sección 5.2. Aumenta el viento con la llegada de la brisa antes del mediodía y se alcanzan los máximos sobre las 15 UTC. La intensificación parece más tardía durante la OC, y más prematura la deceleración; definiendo así un periodo de brisas costeras ligeramente más reducido respecto al periodo en comparación de NOC. La intensidad es reducida en ambos casos, lo que indica el freno al avance del flujo costero por parte de la morfología urbana. Sobre la humedad relativa, a priori, el efecto de un menor porcentaje sería el de favorecer el bienestar térmico, pues es posible una mayor sudoración y transpiración. Por ello, estaría teniendo un efecto más beneficioso durante la OC que en el periodo contrario. Es lógico pensar que el contenido de vapor de agua dependerá en gran medida del aporte de humedad por parte de la brisa, y que, ante una menor intensidad del viento, y temperaturas mayores, el ambiente no alcance valores de humedad relativa tan elevados. Nótese que las curvas siguen la forma contraria a la evolución de la temperatura.

Con todo, el UTCI también refleja la variabilidad espacial en la ciudad, presentando valores entre distintos umbrales del UTCI. Por ejemplo, para el caso de OC, entre estrés térmico intenso (>32 °C) y estrés térmico muy intenso (>38 °C) en las horas centrales. Esto indica que algunas zonas de la ciudad estarían expuestas a un estrés térmico mayor que otras. Sigue, por lo general, la evolución de la temperatura, con valores superiores a esta en las horas diurnas pero muy próximos durante la noche. En las horas de máxima insolación aparece la modulación de la TMR, con fluctuaciones entre los máximos a las 10 y 16 UTC. Destaca que durante la OC se supera de media el umbral de estrés térmico muy intenso (>38 °C) desde las 9 a las 18 UTC, lo que indica un rango horario extenso donde la población está expuesta a un alto estrés térmico. Durante NOC raramente se alcanza este rango.

A continuación, se representan mapas de sombreados de UTCI (figura 12) y TMR (figura 13), superpuestos con contornos (temperatura y humedad relativa) y flechas (viento) para ver las características de la distribución espacial de estas magnitudes. Se eligen los días 6 (NOC) y 23 (OC) como representativos de cada periodo.

Previo al amanecer (figura 12, a, e), se observa un UTCI superior en la zona más céntrica de la ciudad de Valencia, fruto del efecto de sobrecalentamiento urbano en las horas nocturnas. El viento, por otro lado, se observa en estas horas de dirección oeste, y débil; vientos catabáticos y brisa nocturna antagónicos a la brisa marina. Es en esta franja horaria cuando las magnitudes del UTCI, la TMR y la temperatura del aire son más próximas entre sí, sin forzamiento solar ni aplaque del viento. Con el amanecer, empieza a subir la temperatura y la TMR, y se invierte el patrón de calentamiento urbano, como explicaba (Lehoczky et al., 2017): aparece la zona céntrica con una temperatura inferior respecto al resto de área urbana, debido a la penumbra imperante en las zonas altamente urbanizadas (figura 13 a), e)). En este contexto, se obtienen los mayores valores de TMR y UTCI en las zonas más alejadas de la costa. Sobre las 10-11 UTC, debido al calentamiento superficial en el litoral, empieza a incidir la brisa marina. En las segundas columnas de las figuras (12) y (13) se observa la diferencia entre el módulo de viento para OC y NOC. Durante OC a las

11 UTC aún se muestran vientos débiles, mientras que para el periodo NOC se observa una brisa bien desarrollada fruto de una prematura entrada.

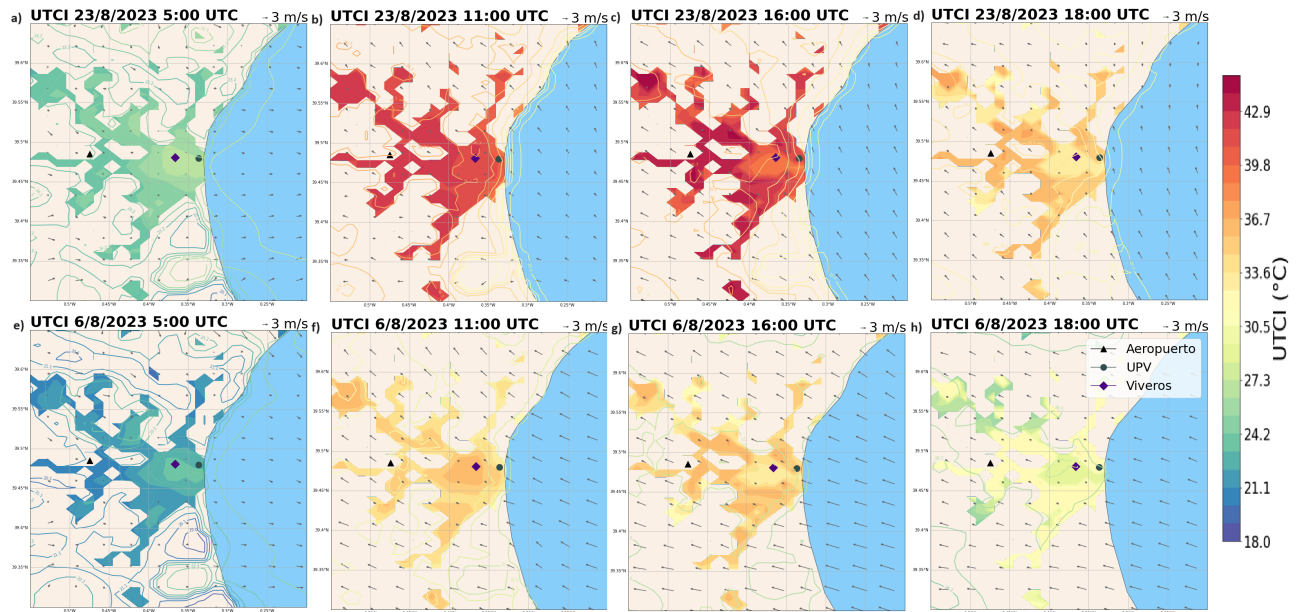


Figura 12: Mapas de UTCI (sombreado), temperatura (contornos) y viento (flechas) para el día 23 (OC) (a,b,c,d) y para el día 6 (NOC)(e,f,g,h). Horas 5,11,16,18 UTC.

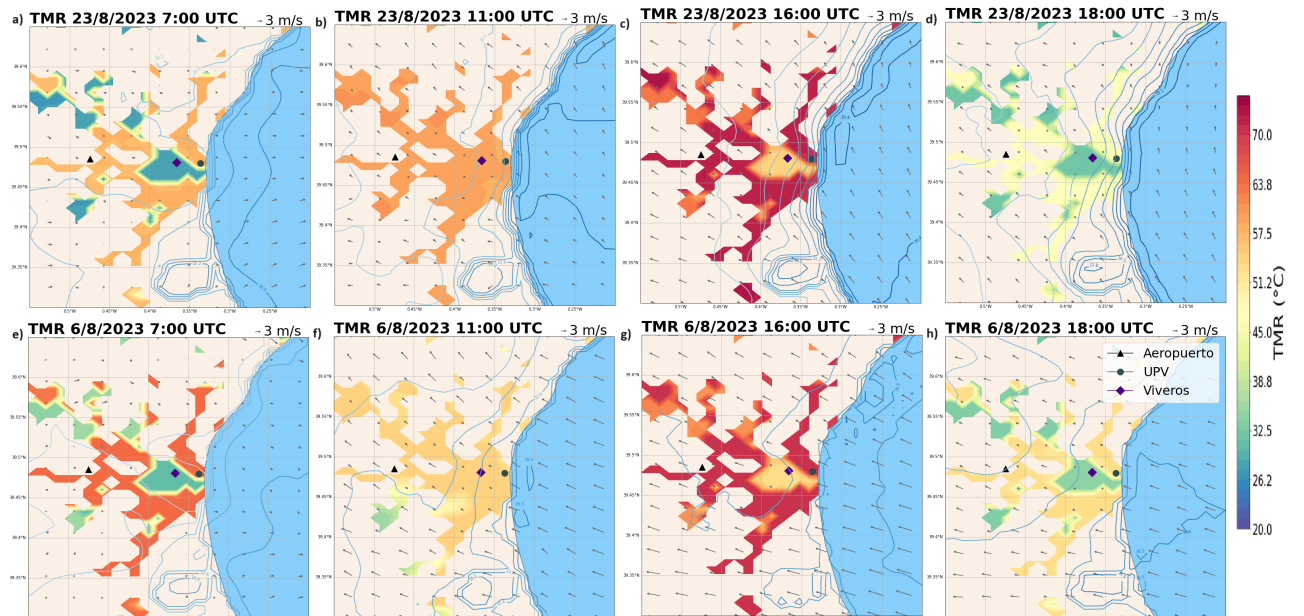


Figura 13: Mapas de TMR (sombreado), humedad relativa (contornos) y viento (flechas) para el día 23 (a,b,c,d) y para el día 6 (e,f,g,h). Horas 7,11,16,18 UTC.

Pasado el mediodía, con el aumento de la intensidad del viento, se produce un ligero descenso de UTCI en todo el dominio, que se veía en la figura (11). Sin embargo, el constante aumento de temperatura del aire, permite el ascenso del estrés térmico hasta las 14-15 UTC (no se muestra).

A partir de entonces, con la inclinación de la incidencia solar, se reduce la TMR. Más significativo es esto en el centro de la ciudad, debido al efecto de la sombra de los edificios (figura 13, c y d). El UTCI, en consecuencia, sigue la misma tendencia. La reducción de éste es más brusca a partir de las 18-19 UTC (figuras 12 y 13, d,h) debido a la simultánea disminución de la temperatura y de la TMR. Además, en esta franja horaria ocurre la reducción del régimen de vientos costeros. Hay que destacar, que durante el periodo de NOC se observa que a esta hora aún se mantiene la dirección sureste característica de la brisa, con una intensidad considerable, mientras que para el día de OC escogido en este momento la brisa es más residual y prácticamente nula en el entorno urbano. Estas diferencias influyen en el grado de ventilación de la ciudad y en la persistencia del calor acumulado durante las horas nocturnas.

Finalmente señalar que el patrón de comportamiento espacial y temporal es muy similar en ambos días escogidos, que son representativos de los dos periodos de interés. Aparecen valores más altos del UTCI por la noche en la zona central de la ciudad respecto a la periferia; este patrón se llega a invertir en las horas diurnas debido a la diferencia de TMR en zonas de sombras y de incidencia directa del sol. La TMR es muy similar en ambos periodos, por lo que a priori es la temperatura del aire lo que provoca la notable diferencia de UTCI entre OC y NOC. A esto le beneficia el régimen menos intenso de brisas durante OC.

5.5. Ponderación de contribuciones al UTCI

En este punto, ya se tiene un análisis cualitativo de las interacciones entre las distintas variables meteorológicas y su impacto en el estrés térmico. Ahora, por otro lado, se efectúa una descripción cuantitativa, viendo la influencia que tienen cada una de ellas en las anomalías de UTCI para ambos periodos escogidos. Esto se hace desde el punto de vista de la correlación estadística mediante el cálculo del coeficiente de regresión de UTCI para cada variable durante el periodo extendido del mes de agosto, desde el día 2 al 25, ambos incluidos, para luego poner en contexto las anomalías que suponen los periodos de OC y NOC en relación a estas magnitudes.

Los colores en la figura (14) marcan el signo de la correlación entre el UTCI y cada variable. En base a esto, se observa que existe un aumento del UTCI ante aumentos de temperatura, TMR y humedad relativa. Por otro lado, la velocidad del viento muestra una relación inversa: mayores velocidades implican disminución del estrés térmico. Todo ello, de manera estadísticamente significativa en cada punto del dominio urbano. Estos aspectos se podían intuir de manera conceptual a raíz de razonamientos físicos, no obstante, de cara a estudiar dependencias y variaciones del UTCI ante la evolución de dichas variables, es conveniente realizar un ejercicio de ponderación de cada efecto. Esto viene reflejado en la magnitud de la regresión. En cada caso, se explica la variación de $^{\circ}\text{C}$ de temperatura de UTCI por la desviación estándar de la variable meteorológica en cada punto. Comparando punto a punto entre los cuatro mapas aparece la temperatura con un valor mayor de regresión frente a las demás variables y supondría un mayor incremento de UTCI ante variaciones de la misma. Hay que tener en cuenta que con este método se asume una relación lineal del UTCI con cada variable independientemente de la relación de dependencia entre ellas y del efecto de esta dependencia en el UTCI, algo que no es completamente cierto, pero cuya asunción proporciona una manera sencilla de estudiar y comparar en cada punto urbano la influencia de cada una de ellas en base a su correlación con el UTCI. Asumiendo esto, al efecto de la temperatura le seguiría el de la TMR y la velocidad del viento, siendo la relación de la humedad relativa más marginal.

Por otro lado en los puntos de la zona central parece existir menor variación del UTCI ante cambios del resto de magnitudes. Si se recuerdan los mapas de la sección anterior, en las horas

nocturnas se mantenía un UTCI alto en el centro de la ciudad respecto al resto del dominio urbano y, posteriormente, más bajo por el efecto de las sombras de los edificios. Por lo que es lógico que aparezca un valor de regresión con cada variable más bajo respecto a la periferia, cuyas variaciones de UTCI son más acentuadas.

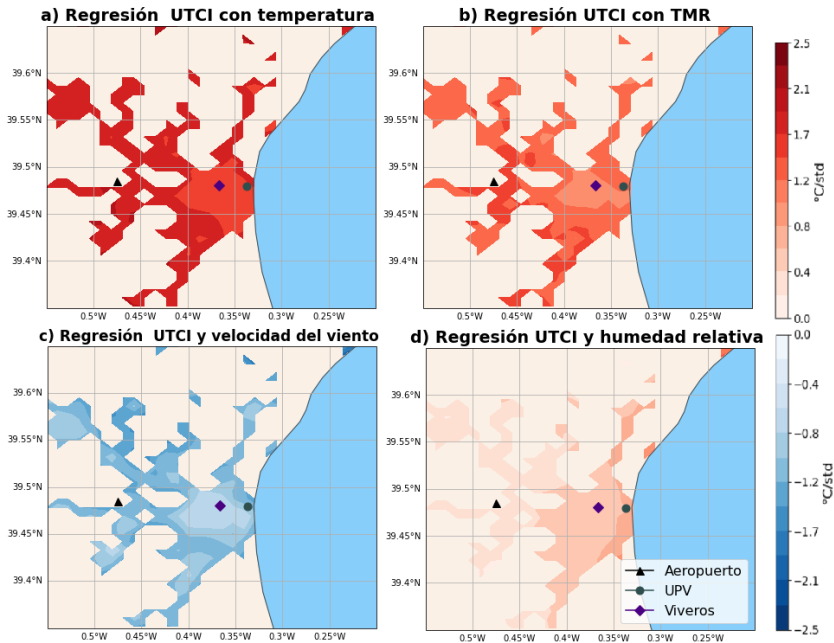


Figura 14: Mapas de regresión del índice de UTCI con índices de (a) temperatura, (b) TMR, (c) intensidad del viento y (d) humedad relativa. Ambos índices con los que se calcula la regresión, construidos en cada punto. Periodo del 2 al 25 de agosto. Unidades: $^{\circ}\text{C UTCI}/\text{std}(\text{variable})$. Significación estadística al 95% en todo el dominio urbano mediante *t-test*. Estaciones meteorológicas AEMET marcadas con símbolos.

Con el objetivo de estudiar cuál es el impacto de dichas variables en el comportamiento del UTCI durante los periodos de OC y NOC, se busca el incremento de UTCI que implica la anomalía de cada una ellas en dichos periodos respecto el resto del mes. Para ello se calcula la anomalía estandarizada promedio, en cada punto, que supone OC y NOC en relación a cada magnitud respecto al resto de agosto. De manera ilustrativa los valores promedios para todo el dominio urbano se muestran en la tabla (5). Estos nos indican, que en promedio, el periodo de OC (NOC), muestra anomalías positivas (negativas) en temperatura y TMR respecto al mes de agosto. Por otro lado, el viento es anómalamente bajo (alto). Los valores de humedad relativa en promedio se encuentran por debajo de la media del mes, en sendos periodos. Multiplicando la desviación estándar de cada punto por los mapas de regresión de la figura (14) se obtiene el incremento de UTCI (en $^{\circ}\text{C}$) que suponen las anomalías de cada variable en cada periodo, OC y NOC (figura 15).

Tabla 5: Anomalía estandarizada media de las variables temperatura, TMR, intensidad del viento y humedad relativa. Media del área urbana en los periodos de OC y NOC.

Periodo	Temperatura (std)	TMR (std)	Viento (std)	Humedad relativa (std)
NOC	-1.06	-0.30	0.59	-0.74
OC	1.14	0.19	-0.38	-1.16

Los resultados muestran que la anomalía de temperatura en OC y NOC es lo que provoca

un mayor cambio en el UTCI respecto al resto de magnitudes en cada punto del dominio urbano (nótese el cambio de escala entre a) y b) y el resto del panel de la figura 15). Se observa un mayor impacto de esta respecto a las demás variables en las zonas más alejadas a la línea de costa, con menos influencia del efecto amortiguador térmico del mar. En cuanto al resto de variables, la anomalía positiva de la TMR y negativa de intensidad del viento durante la OC implica un aumento de UTCI (figura 15 c, e). Los valores de humedad relativa, inferiores a la media del mes, implican una reducción del estrés térmico (g). En el periodo de NOC todas las variables implican una reducción de UTCI (figura 15 d, f, h). Sin embargo, estos incrementos son en general menores que para el caso de la temperatura en cada punto del dominio urbano.

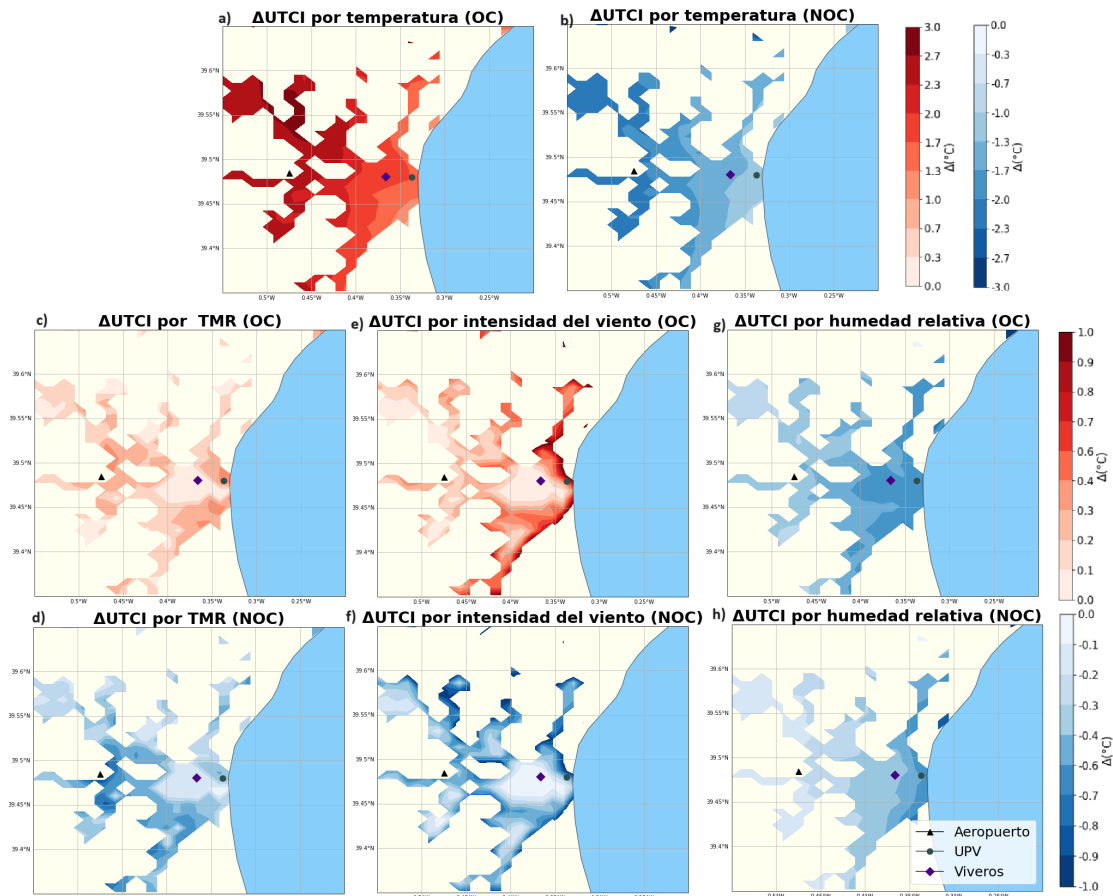


Figura 15: Mapas con los incrementos de $^{\circ}\text{C}$ UTCI que implica la anomalía de cada variable en cada punto durante OC y NOC. a) y b) debido a la temperatura; c) y d), debido a la TMR; e), f) por la contribución del viento, y g) y h) por la humedad relativa. Nótese que la escala es distinta para los mapas de la contribución de la temperatura respecto a resto de variables.

Respecto a la distribución espacial, en el caso de la TMR y la intensidad del viento aparecen para ambos periodos de OC y NOC incrementos en valor absoluto más pequeños en la zona central de la ciudad respecto a los que provoca, por ejemplo, la temperatura. En el caso de la TMR hay que tener en cuenta que las diferencias en su magnitud a lo largo del mes no son muy elevadas -fíjese en la poca diferencia entre OC y NOC en la figura (11c)-, por lo que las anomalías de TMR durante la OC (NOC) no reportan grandes excesos (defectos) en el UTCI, más aun en la zona central donde hay un mayor predominio de las zonas de sombra. Sobre el viento, de la misma manera, en el centro urbano es donde se tiene menores variaciones de intensidad, debido al bloqueo de los

edificios, por lo que su impacto no será muy distinto de una situación atmosférica a otra, si no se tiene un gran forzamiento sinóptico. No obstante, en la zona más próxima a la costa es donde existe menos diferencia con el efecto de la temperatura. En estas zonas expuestas al efecto de la brisa, la intensidad del viento tiene un gran papel en la regulación del confort térmico. En cuanto a la humedad relativa, se observan reducciones de UTCI más grandes cerca de la costa, donde la variabilidad de la humedad relativa provocado por la advección de la brisa tiene mayor impacto en el confort térmico y podría competir con el efecto de la temperatura.

A modo de resultado aglutinador, se muestran en la tabla (6) la media de los incrementos de UTCI en el dominio urbano para ambos periodos de OC y NOC.

Tabla 6: Incremento de UTCI, en °C, provocado por la anomalía media de cada variable en el dominio urbano para cada periodo de interés. En la última fila, la diferencia entre el periodo de OC y NOC.

Periodo	Temperatura	TMR	Viento	Humedad relativa
NOC	-2.01	-0.42	-0.91	-0.29
OC	2.30	0.19	0.51	-0.36
Δ (OC-NOC)	4.31	0.61	1.42	-0.07

Se puede concluir que es la temperatura el factor que más influye en la magnitud del UTCI, alrededor de ± 2 °C en OC y NOC respecto al periodo de referencia del mes de agosto. La anomalía negativa de viento es lo que propicia el segundo mayor incremento de estrés térmico durante OC, aunque se ve aplacado en gran medida por la disminución en la advección de humedad relativa. Por otro lado, parece que la TMR no tiene tanto peso en el incremento de UTCI durante la OC. Hay que tener en cuenta que se está trabajando con anomalías respecto al periodo comprendido entre el 2 y el 25 de agosto, que en general presenta unas TMR elevadas, 41.78 °C en promedio para todo el periodo. Es por ello que es más significativo el descenso de TMR durante el periodo de NOC, que podría ser achacable bien a nubosidad o bien, más probable, a un menor sobrecalentamiento urbano debido a las anomalías positivas de intensidad de viento que permiten la ventilación en la ciudad. La suma de los cuatro factores, de nuevo bajo la asunción de independencia entre ellos y de sus efectos sobre el UTCI, supone un incremento medio de 2.64 °C en el UTCI durante la OC del 21 al 24. Una cifra notable teniendo en cuenta que este mes de agosto ya destaca por su anomalía térmica positiva, presentando un UTCI medio de 31.33 °C en toda la extensión urbana.

6. Resumen y conclusiones

En este trabajo, se ha hecho un análisis tanto desde el punto de vista de la evolución temporal, como de la extensión espacial del índice de confort térmico UTCI en la ciudad de Valencia durante un periodo de ola de calor (OC; 21-24) y no ola de calor (NOC, 4-7) en el mes de agosto de 2023. Para ello se ha utilizado el modelo WRF versión 4.5, cuya simulación ha sido validada con los datos de las estaciones del aeropuerto, Viveros y UPV de la red de AEMET. Mediante los resultados de la simulación se han caracterizado las condiciones meteorológicas, el régimen de brisas y la estructura de la PBL en ambos periodos con el objetivo de identificar diferencias entre ellos. Se ha analizado el ciclo diario del UTCI y de las variables de las que depende (temperatura, TMR, intensidad de viento y humedad relativa), así como un análisis cualitativo de la distribución espacial y las influencias de dichas magnitudes al UTCI. Por último, se ha caracterizado cuantitativamente, con un modelo simple de ponderación a partir de mapas de regresión, la relación de estas magnitudes con la variabilidad del UTCI durante el mes de agosto, y particularizado para los periodos de OC y NOC.

Las principales conclusiones del trabajo son las siguientes:

- La temperatura simulada por el modelo es más precisa en puntos del dominio no urbanos (aeropuerto) que dentro de la ciudad (Viveros, UPV) debido a la aún mejorable elección de parámetros de la representación de las características urbanas que tiene en cuenta el modelo. En cuanto al viento, también existe un cambio en el signo del sesgo entre ambas, con una sobrestimación de la intensidad dentro de la ciudad, lo que también está relacionado con la representación de la morfología urbana.
- El régimen de brisas se reproduce en ambos periodos, OC y NOC. Difieren en la magnitud, más intensa para este último, y ligeramente en la duración, con brisas levemente más duraderas durante NOC.
- La capa mezclada y la altura de la PBL es más reducida para el periodo de OC, debido a la capa estable de aire cálido en capas altas. Esto, provoca una disminución del flujo de calor sensible, lo cual fomenta el estancamiento del aire en superficie e inhibe la entrada de vientos costeros en la ciudad.
- Se observa una mayor acumulación de calor en la zona céntrica de la ciudad durante las horas nocturnas de OC, acorde con resultados de otros trabajos (Lehoczky et al., 2017; Wei and Sobrino, 2024). Se aprecia también el efecto de las sombras en la zona más céntrica durante las horas diurnas, que evita que se dispare la TMR. La evolución diurna y la distribución espacial del UTCI y de las variables de las que depende es similar para ambos periodos. Las diferencias son fundamentalmente en la magnitud de las mismas.
- La temperatura es el condicionante principal del aumento de UTCI durante la OC respecto al resto del mes de agosto, sobre todo en las zonas alejadas de la costa. Le sigue la anomalía negativa de la intensidad de viento que hace aumentar el estrés en las zonas del puerto, usualmente más ventiladas por acción de la brisa marina. Las brisas más débiles y el aumento de temperatura provoca un descenso de humedad relativa que actúa favorablemente para la disminución del estrés térmico durante OC cerca de la costa. La TMR, similar en magnitud en ambos periodos OC y NOC, no supone una diferencia tan destacable en el UTCI entre ambas ventanas temporales.

Como reflexión final, comentar que la temperatura del aire ante eventos sinópticos predominantes de OC es difícilmente modificable, pero sí que se pueden adoptar medidas, mediante planes urbanísticos específicos, para la facilitación de la entrada de la brisa en la ciudad, dado que es un fenómeno que ocurre, como se ha visto, diariamente bajo condiciones estables incluso durante OC; o para la creación de zonas de sombra que permitan que no se dispare la TMR en las horas diurnas. Esto fomentaría que no se alcanzara el umbral de estrés térmico muy intenso (>38 °C de UTCI) sistemáticamente a lo largo de los meses de más calor.

Como posibles mejoras para la ponderación de la influencia de cada magnitud a la intensidad del UTCI, se debería hacer un estudio considerando más meses veraniegos y episodios de OC, para dotar de mayor robustez a las relaciones obtenidas, así como la utilización de otras herramientas más sofisticadas de análisis estadístico como métodos de componentes principales o regresiones multivariante. En este trabajo se ha realizado en base a la anomalía que supone un periodo de OC respecto al mes de agosto de 2023, pero se mantiene la pregunta de si los resultados obtenidos aquí son un comportamiento general.

Referencias

AEMET (2023). Avance Climatológico de agosto de 2023 en la Comunidad Valenciana. https://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima/resumenes?w=1&k=val.

- Ali, E., Cramer, W., Carnicer, J., Georgopoulou, E., Hilmi, N., Le Cozannet, G., and Lionello, P. (2022). Cross-chapter paper 4: Mediterranean region, climate change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *IPCC, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA*.
- Arakawa, A. (1977). Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model. *Methods in Computational Physics. Advances in Research and Application, Vol. 17: General Circulation Models of the Atmosphere*, 337.
- Ballester, F., Corella, D., Pérez-Hoyos, S., Sáez, M., and Hervás, A. (1997). Mortality as a function of temperature. a study in Valencia, Spain, 1991-1993. *International Journal of Epidemiology*, 26(3):551–561.
- Blazejczyk, K., Epstein, Y., Jendritzky, G., Staiger, H., and Tinz, B. (2012). Comparison of UTCI to selected thermal indices. *International Journal of Biometeorology*, 56:515–535.
- Bougeault, P. and Lacarrere, P. (1989). Parameterization of orography-induced turbulence in a mesobeta-scale model. *Monthly Weather Review*, 117(8):1872–1890.
- Broede, P., Blazejczyk, K., Fiala, D., Havenith, G., Holmer, I., Jendritzky, G., Kuklane, K., and Kampmann, B. (2013). The Universal Thermal Climate Index UTCI compared to ergonomics standards for assessing the thermal environment. *Industrial Health*, 51(1):16–24.
- Caselles, V., Lopez Garcia, M., Melia, J., and Perez Cueva, A. (1991). Analysis of the heat-island effect of the city of Valencia, Spain, through air temperature transects and NOAA satellite data. *Theoretical and Applied Climatology*, 43:195–203.
- Chen, F. and Dudhia, J. (2001). Coupling an advanced land surface–hydrology model with the Penn State–NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. *Monthly Weather Review*, 129(4):569–585.
- Cuadrat, J., Serrano-Notivol, R., and Tejedor, E. (2013). Olas de calor y de frío en España. *Fenómenos meteorológicos adversos en España. Edition: World Climate Research Programme. Publishing: AMV Ediciones*, pages 324–342.
- Cuerdo-Vilches, T., Díaz, J., López-Bueno, J. A., Luna, M., Navas, M., Mirón, I., and Linares, C. (2023). Impact of urban heat islands on morbidity and mortality in heat waves: Observational time series analysis of Spain’s five cities. *Science of The Total Environment*, 890:164412.
- Cueva, A. J. P. (2001). Clima y confort en las ciudades: la ciudad de Valencia. *Métode: Anuario*, pages 147–150.
- Demuzere, M., Kittner, J., and Bechtel, B. (2021). LCZ Generator: a web application to create Local Climate Zone maps. *Frontiers in Environmental Science*, 9:637455.
- D’Ippoliti, D., Michelozzi, P., Marino, C., de’Donato, F., Menne, B., Katsouyanni, K., Kirchmayer, U., Analitis, A., Medina-Ramón, M., Paldy, A., et al. (2010). The impact of heat waves on mortality in 9 European cities: results from the EuroHEAT project. *Environmental Health*, 9:1–9.
- Dudhia, J. (1989). Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *Journal of Atmospheric Sciences*, 46(20):3077–3107.
- Ezpeleta, A. M., Royé, D., et al. (2021). Intensidad y duración del estrés térmico en verano en el área urbana de Madrid. *Geographica*, (73):95–113.
- Gagge, A. P., Fobelets, A., and Berglund, L. (1986). A standard predictive index of human response to the thermal environment. *ASHRAE Trans*, 92:709–731.
- García, J. G., López, N. C., and Calvo, J. Z. (2009). *Estadística básica para estudiantes de ciencias*. Departamento de Astrofísica y Ciencias de la Atmósfera, Universidad Complutense de Madrid.
- Hilmi, N., Ali, E., Carnicer Cols, J., Cramer, W., Georgopoulou, E., Le Cozannet, G., and Tirado, C. (2022). Ipcc AR6 WGII cross-chapter paper 4: Mediterranean region, EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-10590, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-10590>, 2022.
- Höppe, P. (1999). The physiological equivalent temperature—a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International journal of Biometeorology*, 43:71–75.

- Jendritzky, G., de Dear, R., and Havenith, G. (2012). UTCI—why another thermal index? *International Journal of Biometeorology*, 56:421–428.
- Jiménez, P. A., Dudhia, J., González-Rouco, J. F., Navarro, J., Montávez, J. P., and García-Bustamante, E. (2012). A revised scheme for the WRF surface layer formulation. *Monthly Weather Review*, 140(3):898–918.
- Lehoczky, A., Sobrino, J., Skoković, D., and Aguilar, E. (2017). The Urban Heat Island effect in the city of Valencia: A case study for hot summer days. *Urban Science*, (1):9.
- Lozano Esteban, D. (2010). Analisis de la ciudad de Valencia. *Análisis de la situación actual de la ciudad para la elaboración del Proyecto del Parque Central de Valencia. Máster en Jardinería y Paisaje de la Universidad Politécnica de Valencia.*
- Martilli, A., Clappier, A., and Rotach, M. W. (2002). An urban surface exchange parameterisation for mesoscale models. *Boundary-Layer Meteorology*, 104:261–304.
- Martilli, A., Nazarian, N., Krayenhoff, E. S., Lachapelle, J., Lu, J., Rivas, E., Rodriguez-Sanchez, A., Sanchez, B., and Santiago, J. L. (2023). Wrf-Comfort: Simulating micro-scale variability of outdoor heat stress at the city scale with a mesoscale model. *EGU Sphere*, 2023:1–30.
- Miró Pérez, J. J., Olcina, J., et al. (2020). Cambio climático y confort térmico. Efectos en el turismo de la Comunidad Valenciana. *Investigaciones Turísticas*, (20):1–30.
- Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J., and Clough, S. A. (1997). Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D14):16663–16682.
- Oke, T. R. (1995). The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects. *Wind Climate in Cities*, pages 81–107.
- Román-Cascón, C., Mulero-Martínez, R., Bruno, M., Izquierdo, A., Yagüe, C., Álvarez, O., Gómez-Enri, J., Mañanes, R., and Adame, J. A. (2022). Coastal-breeze simulation with the WRF model: analysing the sensitivity to land/sea surface temperature changes, EMS Annual Meeting 2022, Bonn, Germany, 5–9 Sep 2022, EMS2022-199, <https://doi.org/10.5194/ems2022-199>.
- Salamanca, F., Krpo, A., Martilli, A., and Clappier, A. (2010). A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations—part I. formulation, verification, and sensitivity analysis of the model. *Theoretical and Applied Climatology*, 99:331–344.
- Salamanca, F., Martilli, A., and Yagüe, C. (2012). A numerical study of the Urban Heat Island over Madrid during the DESIREX (2008) campaign with WRF and an evaluation of simple mitigation strategies. *International Journal of Climatology*, 32(15):2372–2386.
- Simón, F., Lopez-Abente, G., Ballester, E., and Martínez, F. (2005). Mortality in Spain during the heat waves of summer 2003. *Eurosurveillance*, 10(7):9–10.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J., Wang, W., Powers, J. G., Duda, M. G., Barker, D. M., et al. (2019). A description of the advanced research WRF version 4. *NCAR Tech. Note ncar/tn-556+ str*, 145.
- Stewart, I. D. and Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12):1879–1900.
- Uhl, J. H., Royé, D., Burghardt, K., Aldrey Vázquez, J. A., Borobio Sanchiz, M., and Leyk, S. (2023). Hisdac-es: historical settlement data compilation for Spain (1900–2020). *Earth System Science Data Discussions*, 2023:1–51.
- Watkins, R., Littlefair, P., Kolokotroni, M., and Palmer, J. (2002). The London heat island—Surface and air temperature measurements in a park and street gorges. *ASHRAE Transactions*, 108(1):419–427.
- Wei, L. and Sobrino, J. A. (2024). 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*, 130:103875.
- Wilks, D. S. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences*, volume 100. Academic press.
- Yagüe, C., Zurita, E., and Martínez, A. (1991). Statistical analysis of the Madrid urban heat island. *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere*, 25(3):327–332.