

Ponencia 3

Servicios climáticos

PROPUESTA PARA EL CAMBIO DE COMPORTAMIENTO PARA UN TURISMO CLIMÁTICAMENTE RESILIENTE: COSTA DAURADA Y TERRES DE L'EBRE

Anna BOQUÉ-CIURANA^{1,2}, Carla GARCIA-LOZANO³, Carolina MARTÍ³, Gabriel BORRÀS⁴, Enric AGUILAR^{1,2}, Itziar LABAIRU⁵ y Georgina GINÉ⁶

¹*Institut Universitari de Recerca en Sostenibilitat, Canvi Climàtic i Transició Energètica. Universitat Rovira i Virgili.*

²*Centre for Climate Change. Departament de Geografia. URV.*

³*Departament de Geografia, Universitat de Girona.*

⁴*Oficina Catalana de Canvi Climàtic, Generalitat de Catalunya*

⁵*Eurecat, Centro Tecnológico de Catalunya Servicio de Planificación Turística*

⁶*Dirección General de Turismo, Departamento de Empresa y Trabajo, Generalitat de Catalunya*

anna.boque@urv.cat, carla.garcia@udg.edu, carolina.marti@udg.edu,
gborras@gencat.cat, enric.aguilar@urv.cat, georginagine@gencat.cat,
itziar.labairu@eurecat.org

RESUMEN

Este estudio analiza cómo promover un cambio de comportamiento hacia un turismo resiliente al clima en dos destinos costeros de Cataluña: Costa Daurada y Terres de l'Ebre. A través de la integración de conocimientos sobre servicios climáticos y el sistema playa-duna, se busca fomentar prácticas sostenibles y desarrollar acciones de adaptación. La colaboración de actores locales tiene como objetivo mejorar la sostenibilidad ambiental y la resiliencia de estos destinos frente a la variabilidad y el cambio del clima.

Palabras clave: cambio de comportamiento, turismo resiliente, sostenibilidad, adaptación climática.

ABSTRACT

This study analyzes how to promote a behavior change towards climate-resilient tourism in two coastal destinations in Catalonia: Costa Daurada and Terres de l'Ebre. By integrating knowledge about climate services, and the beach-dune system, the aim is to encourage sustainable practices and develop adaptation actions. The collaboration of local stakeholders seeks to enhance environmental sustainability and the resilience of these destinations to climate variability and change.

Key words: behavioral change, resilient tourism, sustainability, climate adaptation.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la variabilidad y el cambio climático afectan a diversos sectores económicos. El turismo, en particular, es un sector sensible al clima ampliamente reconocido que involucra diversas actividades recreativas en todo el mundo, como mar-sol-arena (3S, *sea, sun and sand* en inglés), experiencias culturales, ciclismo, golf, esquí, senderismo y navegación. La variabilidad y el cambio climático influyen en los mercados de origen y en los comportamientos de los turistas (incluyendo motivaciones de viaje y elecciones de destinos), en los operadores turísticos (como alojamientos, diseño de infraestructura y transporte) y en los propios destinos (Scott et al., 2010).

España es un destino turístico global de primer nivel, pero también se ve significativamente afectada por el cambio climático. Su clima favorable durante todo el año ha permitido el desarrollo de diversas actividades recreativas al aire libre más allá del turismo basado en la playa, lo que reduce la alta estacionalidad del turismo. Aunque el clima es actualmente un activo, puede convertirse en una limitación para estas actividades en el futuro (Cardell et al., 2022). Se espera que la industria del turismo también sufra los impactos indirectos del cambio climático, como la reducción de la disponibilidad y calidad del agua, el aumento de los costos de los alimentos, los precios más altos de la energía, el aumento del nivel del mar, la erosión de las playas y la mayor frecuencia de incendios forestales (Scott, 2010; Gössling et al., 2012; Scott et al., 2012, 2019).

El uso de agua por parte de los turistas es especialmente relevante (Gössling et al., 2012; Hadjikakou et al., 2013; Becken, 2014), y se espera que la demanda de agua aumente con el incremento en el número de turistas, hoteles y atracciones turísticas, como spas, piscinas y campos de golf (Gössling & Peeters, 2015). La región mediterránea es una de las áreas más afectadas por los impactos del cambio climático (Diffenbaugh & Giorgi, 2012; Paeth et al., 2017; Tuel & Ealtahir, 2020; IPCC, 2021). Sin duda, España tendrá que enfrentar los desafíos impuestos por el cambio climático a través de estrategias de mitigación y adaptación a escalas locales y regionales para la industria turística, que es el sector económico más importante en términos de ingresos y empleo. Según los datos destacados de la OMT (UNWTO, 2018), España se convirtió en el segundo destino del mundo en 2017, con 81.8 millones de llegadas de turistas internacionales y 68 mil millones de dólares estadounidenses en ingresos turísticos. Además, fue el país europeo líder en el número de noches de estancia de visitantes extranjeros. Es probable que el cambio climático degrade las actuales condiciones favorables para las actividades turísticas al aire libre durante el verano mediterráneo para 2050, mientras que se espera que las condiciones climáticas mejoren durante la primavera y el otoño (Moreno & Amelung, 2009; Rutty & Scott, 2010; Amengual et al., 2014; Kovats et al., 2014).

Los ecosistemas dunares, antaño comunes a lo largo de las costas, están desapareciendo a un ritmo alarmante en todo el mundo. En Europa, hacia finales del siglo XX, se perdió cerca del 70% de los hábitats de dunas. La situación es aún más crítica en la costa catalana, donde se estima que hasta el 90% de estos espacios han sufrido un grave deterioro. Esta pérdida está fuertemente vinculada a la urbanización costera y al turismo de playa, principales motores de la degradación de los paisajes dunares (García-Lozano, 2021). El objetivo de esta comunicación es comprender la

percepción de los agentes territoriales acerca de: 1) la influencia de las condiciones meteo-climáticas en la actividad turística, 2) cómo el uso de fotografías históricas puede modificar la percepción de estos agentes sobre la relevancia y conservación del sistema playa-duna.

2. MÉTODOS

El clima juega un papel importante en el desarrollo de las actividades turísticas y de ocio (Becken, 2010). El turismo depende en gran medida de las condiciones climáticas de un destino determinado, por esta razón, Grillakis et al. (2016) examinaron el impacto de un aumento global de dos grados en el turismo de verano europeo desde la perspectiva del confort climático. En este contexto, existe una necesidad de cambio de comportamiento para un turismo resiliente al clima.

La presente investigación propone un enfoque nuevo e integrado para explorar las percepciones de los actores sobre cómo diferentes elementos ambientales impactan en la actividad turística. Con este propósito, adaptamos la metodología de Font-Barnet et al. (2021) para la co-creación de servicios climáticos en diferentes destinos turísticos europeos. El nuevo enfoque no solo incluye el tiempo, el clima y el cambio climático, sino también la percepción del sistema playa-duna por parte de los agentes territoriales. Este enfoque busca integrar estas dos esferas de conocimiento para comprender las percepciones de los actores sobre los desafíos ambientales en su destino turístico. Para ello, se han desarrollado mesas de trabajo con grupos focales como una herramienta metodológica para abordar las temáticas mencionadas en el objetivo de la comunicación. Los grupos focales son sesiones en las que un pequeño grupo de personas, en este caso, agentes territoriales, se reúnen para discutir y compartir percepciones, opiniones y experiencias sobre un tema específico. En este caso, se han tratado las temáticas que se pueden observar en el paso 3 (Figura 1). . Para recopilar las percepciones de los actores territoriales, primero involucramos a los actores clave (primer paso). Luego, se llevaron a cabo dos talleres de co-creación en dos destinos turísticos diferentes (segundo paso), siguiendo la misma estructura para ambos. El taller comenzó con una breve presentación del Servicio Meteorológico de Cataluña sobre los climas en Cataluña, seguida de una presentación de la Oficina Catalana de Cambio Climático sobre la estrategia catalana de adaptación al cambio climático. Posteriormente, se ofrecieron pequeñas "píldoras de conocimiento" sobre: clima, tiempo y cambio climático (1) – explicando las diferencias clave y su impacto en el turismo-, agua y energía (2): mostrando la importancia de la gestión sostenible de estos recursos y el sistema playa-duna(3): valor ecológico y turístico de estos ecosistemas costeros. Las píldoras de conocimiento son sesiones breves que ofrecen información esencial para orientar las discusiones en los grupos focales. Estas píldoras brindaron a los participantes una comprensión básica de cada tema, ayudándoles a enriquecer su análisis y reflexión en las mesas de trabajo.

Después de estas presentaciones, se realizaron mesas de trabajo en grupos focales para trabajar con el método adaptado de co-creación de Font-Barnet et al., (2021), agrupando a los actores en grupos heterogéneos. El proceso de co-creación (Figura 1) involucró a actores públicos y privados de la *Costa Daurada* y *Terres de l'Ebre*, quienes participaron activamente en los talleres. Cada taller incluyó una mesa de

trabajo para cada esfera de conocimiento. El presente estudio se centra en presentar los resultados de las percepciones de los actores (tercer paso).

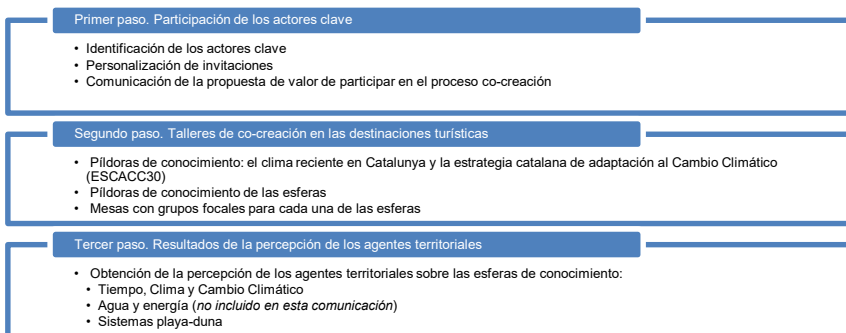


Fig. 1: Procedimiento para recopilar las percepciones de los actores con el fin de promover un cambio de comportamiento hacia un turismo resiliente al clima.

Fuente: elaboración propia.

Para las mesas de **co-creación referidas al tiempo, clima y cambio climático**, se adaptó la metodología de co-creación por Font-Barnet et al., (2021). El proceso se desarrolla en tres pasos interconectados. En el primer paso, se identifican las relaciones entre el clima y las actividades turísticas, reflexionando sobre el impacto de eventos meteorológicos extremos y otros factores en el turismo. El segundo paso clasifica las condiciones climáticas que afectan estas actividades, desde las más perjudiciales hasta las más beneficiosas. En el tercer paso, se discuten medidas de adaptación ante el cambio climático, buscando estrategias proactivas para proteger y mejorar el turismo. Este proceso inclusivo, guiado por un facilitador, promueve la colaboración y la planificación de un turismo resiliente al clima. Para las mesas de **co-creación referidas al sistema playa-duna** se emplea la fotografía repetida para ofrecer una visión integral de las evoluciones de los ecosistemas a lo largo del tiempo. Específicamente, la fotografía repetida, un enfoque sencillo y rentable, permite identificar cambios a pequeña y gran escala en la apariencia de los paisajes, incluidas las formas del terreno, la vegetación y los usos del suelo. Integrar métodos participativos con fuentes geohistóricas para evaluar las percepciones de los usuarios de las playas sobre la evolución de los paisajes costeros representa un enfoque innovador que aún no ha sido completamente explorado.

3. RESULTADOS

La Figura 2 muestra cómo las condiciones meteo-climáticas impactan en distintas actividades turísticas. Para el destino turístico de la *Costa Daurada* los agentes territoriales han destacado las siguientes actividades: turismo de sol y playa (1), gastronomía en interior (2) y gastronomía en exterior (3). Los resultados del análisis sobre el impacto de las condiciones climáticas en las actividades turísticas de la Costa Daurada se centran en dos áreas clave: el turismo de sol y playa y la gastronomía. Por lo que se refiere al turismo de sol y playa se observa que las condiciones climáticas

extremas, como lluvias intensas, tormentas y vientos fuertes, afectan negativamente la experiencia turística, provocando problemas como agua de mar sucia y la proliferación de algas y medusas. Por otro lado, condiciones óptimas—sol, altas temperaturas y agua limpia—mejoran la calidad percibida del destino y aumentan la demanda de servicios. Factores como el fuerte oleaje y altas temperaturas del agua son perjudiciales, mientras que condiciones de calma fomentan la afluencia de visitantes. Esto resalta la necesidad de que los destinos costeros se preparen para mitigar los impactos negativos del cambio climático. Por lo que se refiere al turismo de gastronomía en interiores y exteriores, se observa que las condiciones meteorológicas también tienen un papel crucial. En interiores, el clima adverso afecta principalmente la cadena de suministro, dificultando el acceso a productos frescos, aunque no impacta directamente en la comodidad de los comensales. En espacios exteriores, sin embargo, las condiciones adversas reducen la posibilidad de disfrutar de actividades al aire libre.

Destino Costa Daurada						
Turismo de sol y playa	Lluvia/Tormentas	Temperatura baja	Lluvia intermitente	Temperatura del aire alta	Buena Calidad del agua	Sol
	Fuerte oleaje/Tormentas/Vientos elevados	Temperatura del agua elevada + ola de calor	Nubes	Temperatura del agua baja+ ola de calor	Olas pequeñas / mar en calma	Servicios en las playas
	Lluvia intermitente + viento		Presencia de algas/hierbas			
	Medusas		Viento			
	"Plagas" de algas/hierbas		Mar sucio			
Destino Costa Daurada						
Gastronomía en el interior			Lluvia / Viento			
			Sol			
				Temperaturas muy altas		
				Temperaturas muy bajas		
		Sin acceso al producto debido a condiciones meteorológicas adversas				
Gastronomía en el exterior	Lluvia / viento	Temperatura muy alta				
		Temperatura muy baja				

Fig. 2: Identificación de actividades turísticas y grado de afectación por condiciones meteo-climáticas en la Costa Daurada. Fuente: Elaboración propia.

En contraste, el sol y temperaturas suaves favorecen la experiencia gastronómica al aire libre, siendo condiciones clave para su éxito. Este análisis proporciona información valiosa para la planificación y adaptación de las actividades turísticas frente a la variabilidad climática. Para el caso del destino turístico de Terres de l'Ebre (Figura 3) los agentes territoriales que participaron en la mesa de co-creación identificaron las distintas actividades: visita guiada Deltapolet (1), visita guiada al Parque natural dels Ports Iprojecta (2), guiaje consciente Iprojecta (3) y experiencia cultural de cultivo tradicional del arroz (4) -teniendo en cuenta que Iprojecta es un equipo pluridisciplinario que se dedica al guiaje y a la educación ambiental-. Los resultados del análisis sobre el impacto de las condiciones climáticas en las actividades turísticas de Terres de l'Ebre se centran en las visitas guiadas y las experiencias culturales. Las visitas guiadas en el Delta de l'Ebre y en Ports Iprojecta se ven afectadas de manera diferente por las condiciones climáticas. En el Delta, la lluvia intensa o moderada y el viento extremo tienen efectos negativos, mientras que el sol en invierno y la baja intensidad del viento son favorables. En Ports Iprojecta, las lluvias moderadas y las tormentas representan mayores desafíos, interrumpiendo las actividades, aunque el sol y el bajo viento favorecen la apreciación del paisaje. Las experiencias culturales, como el guía consciente y las actividades relacionadas con el cultivo del arroz, también son sensibles a las condiciones meteorológicas. Tormentas y fenómenos meteorológicos extremos pueden perjudicar estas actividades, aunque, en general, las condiciones suelen ser buenas. La presencia de sol y sombra en días calurosos mejora la experiencia, y en algunos casos, la lluvia moderada o la niebla pueden agregar valor visual a los paisajes.

Destino Terres de l'Ebre						
Visita guiada Deltapolet	Lluvia (intensa o no)			Alta intensidad del viento, visita a las dunas		Nieve
						Sol en invierno, sin alta intensidad de viento
Visita guiada Ports Iprojecta	Viento extremo					Sol en invierno, sin alta intensidad de viento
	Lluvia (intensa o no)					
Guiaje consciente Iprojecta	Temperaturas extremas	Lluvia moderada			Viento extremo	
	Tormenta con aparato eléctrico			Viento extremo	Lluvia moderada Niebla (para vería)	Sol en invierno sin alta intensidad de viento
Experiencia cultural: Cultivo tradicional del arroz	Fenómenos localmente violentos					En términos generales, todas las condiciones son buenas
						En caso de sol hay espacios con sombra

Fig. 3: Identificación de actividades turísticas y grado de afectación por condiciones meteo-climáticas en Terres de l'Ebre. Fuente: Elaboración propia.

En un análisis sobre las **medidas de adaptación relacionadas con las condiciones meteo-climáticas** en la Costa Daurada, se identifican acciones específicas según el plazo temporal. Para un horizonte de 3 a 7 días, tanto en el ámbito privado como público, se gestionan compras y personal, y se activa un sistema de alerta para

responder rápidamente a las condiciones climáticas. No se detallan decisiones ante condiciones negativas en este corto plazo. En un plazo de 3 meses, las acciones públicas incluyen campañas informativas para convencer a la población y fomentar servicios complementarios, como ocio y gastronomía. Además, se planifican infraestructuras y servicios para mitigar impactos negativos. A 1 año, se desarrollan sistemas de alerta y se ofrecen actividades adaptadas a las condiciones meteorológicas. Finalmente, en un horizonte de 10 años, se prioriza la sensibilización y comunicación ambiental para crear conciencia sobre la adaptación a las condiciones climáticas.

Por lo que se refiere a las mediadas de adaptación identificadas en Terres de l'Ebre, En un horizonte de 1 día, no se realizan acciones específicas ante condiciones meteorológicas positivas, mientras que, si son negativas, el guía no cobra y se anulan las actividades, dejando poco margen para la adaptación. Para un plazo de 3 días, se gestionan reservas y se pueden cambiar a actividades viables. Si las condiciones son negativas, se opta por un cambio de actividad, aunque esto también implica la necesidad de adaptar la empresa. En el ámbito semanal, se realizan preparativos según lo que se puede hacer en función de la estación. Esto incluye adecuar el contenido de las actividades y temporalizarlas. Si las condiciones son desfavorables, se refuerza el lugar donde se debe realizar la actividad y se comunica a los clientes la necesidad de preparar material específico. A nivel estacional, se enfatiza la importancia de integrar el medio ambiente con el turismo, así como la educación ambiental. Se consideran juegos de rol, actividades en el parque y estrategias para darse a conocer. Finalmente, en un horizonte de 10 a 30 años, se propone hacer publicidad para promover actividades en condiciones favorables y copiar actividades de lugares con condiciones similares, asegurando una mayor adaptabilidad a lo largo del tiempo.

Los resultados sobre la **percepción del sistema playa-duna** (Figura 4) en la costa destacan la importancia de la documentación histórica para alinear las percepciones de los actores clave con las realidades científicas. Sin datos históricos, los actores presentaron una comprensión inexacta de los cambios ecológicos, geomorfológicos y paisajísticos en estos sistemas. Las ideas preconcebidas sobre el estado histórico de las playas diferían significativamente de las realidades documentadas por la ecología histórica. Sin embargo, al mostrar fotografías históricas, se observó un cambio notable en sus puntos de vista, alineándose más con los cambios ambientales identificados por la investigación científica. Este estudio demuestra cómo integrar evidencia geohistórica en procesos participativos mejora la conciencia de los actores sobre los cambios ecológicos y fomenta un enfoque más colaborativo en las iniciativas de conservación costera.



Fig. 4: Mesa de co-creación sobre percepción del sistema playa-duna en el taller de la Costa Daurada. Fuente: Elaboración propia.

4. DISCUSIÓN

Los resultados del análisis sobre el impacto de las condiciones climáticas en las actividades turísticas de la Costa Daurada y Terres de l'Ebre resaltan la necesidad urgente de adoptar estrategias de adaptación para asegurar la resiliencia del turismo frente al cambio climático. Fluctuaciones climáticas, como tormentas y olas de calor, afectan significativamente las experiencias turísticas, impactando tanto en las actividades recreativas al aire libre como las vinculadas al patrimonio cultural.

En la Costa Daurada, el turismo de sol y playa es especialmente vulnerable a eventos climáticos adversos, que afectan la calidad de la experiencia y la seguridad de los visitantes. Sin embargo, también hay oportunidades en condiciones favorables que atraen a turistas, subrayando la importancia de integrar estrategias que minimicen los efectos negativos y maximicen los beneficios. Las actividades turísticas en Terres de l'Ebre son sensibles a fenómenos extremos, como tormentas, pero también presentan condiciones óptimas en ciertas épocas, lo que resalta la necesidad de adaptar las actividades a las fluctuaciones estacionales y mejorar las infraestructuras para responder ante eventos extremos. La preservación de los sistemas playa-duna es crucial, ya que protege la costa de la erosión y mantiene el atractivo turístico.

La gestión eficiente de recursos hídricos y energéticos es otra prioridad para crear un turismo más resiliente. La adopción de tecnologías de reutilización de agua y energías renovables puede ayudar a mitigar los impactos del cambio climático.

Entre las recomendaciones clave para mejorar la resiliencia del turismo costero en Cataluña se incluyen la mejora de infraestructuras, la diversificación de la oferta turística y la promoción de actividades alternativas. También se debe sensibilizar a turistas y actores locales sobre los riesgos del cambio climático.

Además, los resultados de esta comunicación son coherentes con la Estrategia Catalana de Adaptación al Cambio Climático, 2021-2030 (ESCACC30) y contribuyen al desarrollo de las medidas de reducción de la vulnerabilidad por parte del sector turístico de sol y playa.

En conclusión, para lograr un turismo resiliente al clima en la costa catalana, es fundamental adoptar un enfoque holístico que combine la adaptación a las condiciones climáticas, la diversificación de la oferta turística, la preservación de los ecosistemas playa-duna, y la implementación de prácticas sostenibles en la gestión de agua y energía. Solo a través de un cambio de comportamiento en todos los niveles será posible garantizar la sostenibilidad y el éxito del sector turístico en un contexto de creciente variabilidad climática.

AGRADECIMIENTOS

El proyecto Impetus ha sido financiado por el programa Horizonte 2020 de la Unión Europea bajo el acuerdo de subvención N.º 101037084, correspondiente a la convocatoria del Pacto Verde de la UE.

REFERENCIAS

- Amengual, A., Homar, V., Romero, R., Ramis, C., & Alonso, S. (2014). Projections for the 21st century of the climate potential for beach-based tourism in the Mediterranean. *International Journal of Climatology*, 34 (13), 3481–3498. <https://doi.org/10.1002/joc.3922>
- Becken, S. (2013). A review of tourism and climate change as an evolving knowledge domain. *Tourism Management Perspectives*, 6, 53-62.
- Becken, S. (2014). Water equity—Contrasting tourism water use with that of the local community. *Water Resources and Industry*, 7–8, 9–22. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2014.09.002>
- Cardell, M. F., Amengual, A., & Romero, R. (2023). Present and future climate potentials for several outdoor tourism activities in Spain. *Journal of Sustainable Tourism*, 31(10), 2219-2249.
- Diffenbaugh, N. S., & Giorgi, F. (2012). Climate change hotspots in the CMIP5 global climate model ensemble. *Climatic Change*, 114(3–4), 813–822. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0570-x>
- Font-Barnet, A. F., Boqué-Ciurana, A., Olano-Pozo, J. X., Russo, A., Coscarelli, R., Antronico, L., De Pascale, F., Saladié, Ò., Anton Clavé, S., & Aguilar, E. (2021). Climate services for tourism: An applied methodology for user engagement and co-creation in European destinations. *Climate Services*, 23, 100249. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2021.100249>
- García-Lozano, C. (2021). La gestió integrada del litoral català en el marc de la reflexió del CADS “Un litoral al límit”. Barcelona: Consell Assessor per al Desenvolupament Sostenible. Documento sin publicar.
- Gössling, S., & Peeters, P. (2015). Assessing tourism’s global environmental impact 1900–2050. *Journal of Sustainable Tourism*, 23(5), 639–659. <https://doi.org/10.1080/09669582.2015.1008500>

- Gössling, S., Peeters, P., Hall, C. M., Ceron, J.-P., Dubois, G., Lehmann, L. V., & Scott, D. (2012). Tourism and water use: Supply, demand, and security. An international review. *Tourism Management*, 33(1), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2011.03.015>
- Grillakis, M. G., Koutroulis, A. G., Seiradakis, K. D., & Tsanis, I. K. (2016). Implications of 2 C global warming in European summer tourism. *Climate Services*, 1, 30-38.
- Hadjikakou, M., Chenoweth, J., & Miller, G. (2013). Estimating the direct and indirect water use of tourism in the eastern Mediterranean. *Journal of Environmental Management*, 114, 548-556.
- IPCC. (2021). Summary for policymakers. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. P. S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelek I, R. Yu & B. Zhou (Eds.), *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press.
- Kovats, R., Valentini, R., Bouwer, L., Georgopoulou, E., Jacob, D., Martin, E., Rounsevell, M., & Soussana, J. (2014). *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part B: Regional aspects* (pp. 1267–1326). Cambridge University Press.
- Moreno, A., & Amelung, B. (2009). Climate change and tourist comfort on Europe's beaches in summer: A reassessment. *Coastal Management*, 37(6), 550–568. <https://doi.org/10.1080/08920750903054997>
- Paeth, H., Vogt, G., Paxian, A., Hertig, E., Seubert, S., & Jacobeit, J. (2017). Quantifying the evidence of climate change in the light of uncertainty exemplified by the Mediterranean hot spot region. *Global and Planetary Change*, 151, 144–151. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.03.003>
- Rutty, M., & Scott, D. (2010). Will the Mediterranean become “too hot” for tourism? A reassessment. *Tourism and Hospitality Planning & Development*, 7(3), 267–281. <https://doi.org/10.1080/1479053X.2010.502386>
- Scott, D., & Lemieux, C. (2010). Weather and climate information for tourism. *Procedia Environmental Sciences*, 1, 146–183. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2010.09.011>
- Scott, D., Gössling, S., & Hall, C. M. (2012). International tourism and climate change. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 3(3), 213–232. <https://doi.org/10.1002/wcc.165>
- Scott, D., Hall, C. M., & Gössling, S. (2019). Global tourism vulnerability to climate change. *Annals of Tourism Research*, 77, 49–61. <https://doi.org/10.1016/j.annals.2019.05.007>
- Tuel, A., & Eltahir, E. A. (2020). Why is the Mediterranean a climate change hot spot? *Journal of Climate*, 33(14), 5829–5843. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0910.1>
- UNWTO. (2018). *Tourism highlights 2018 edition*. Technical report, World Tourism Organization. Madrid. <https://www.e-unwto.org/10.18111/9789284419876>

Cardell, M. F., Amengual, A., & Romero, R. (2023). Present and future climate potentials for several outdoor tourism activities in Spain. *Journal of Sustainable Tourism*, 31(10), 2219-2249.

Gössling, S., Peeters, P., Hall, C. M., Ceron, J.-P., Dubois, G., Lehmann, L. V., & Scott, D. (2012). Tourism and wateruse: Supply, demand, and security. An international review. *Tourism Management*, 33(1), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2011.03.015>

Scott, D., & Lemieux, C. (2010). Weather and climate information for tourism. *Procedia Environmental Sciences*, 1, 146–183. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2010.09.011>

Scott, D., Gössling, S., & Hall, C. M. (2012). International tourism and climate change. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 3(3), 213–232. <http://doi.org/10.1002/wcc.165>

Scott, D., Hall, C. M., & Gössling, S. (2019). Global tourism vulnerability to climate change. *Annals of Tourism Research*, 77, 49–61. <https://doi.org/10.1016/j.annals.2019.05.007>

IBERA: REANÁLISIS REGIONAL SOBRE ESPAÑA A 2.5 KM DE RESOLUCIÓN

Javier CALVO¹, Joan CAMPINS¹, María DíEZ¹, Alberto JIMÉNEZ¹, Ana MONTORO MENDOZA², Gema MORALES¹, Beatriz NAVASCUÉS¹, Candelas PERAL¹ y Jana SÁNCHEZ-ARRIOLA¹

¹Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). España

² Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Instituto de Geociencias (IGEO), Madrid, España

mdiezm@aemet.es, mperalg@aemet.es

RESUMEN

El reanálisis IBERA (IBERian ReAnalysis) es un proyecto de reanálisis con resolución 2.5 km que se inició en 2020 con la creación de un prototipo de alta resolución basado en HARMONIE-AROME, acompañado de un análisis de superficie *offline*. Actualmente, el prototipo inicial, que presentaba un valor añadido en comparación con otros reanálisis disponibles, se está perfeccionando mediante una versión actualizada de HARMONIE-AROME, un incremento en el número de niveles verticales considerados y una expansión del dominio. Asimismo, se está aumentando el número de observaciones utilizadas y se estudia la incorporación de datos de satélite y GPS GNSS *Zenit Total Delay* (ZTD).

Inicialmente, el reanálisis abarcará el periodo 1990-2024 con intención de continuar produciéndolo en tiempo real con un retraso aproximado de dos meses para optimizar la recepción y control de calidad de las observaciones. Se estima que la producción finalice durante el tercer trimestre de 2026. Se espera una mejora en la representación de fenómenos a pequeña escala y estimación de precipitación, campos hidrológicos y energía eólica y solar. En esta comunicación se describe la configuración del sistema y se especifican las observaciones utilizadas. Además, se muestran las primeras pruebas de impacto y se describen los planes de producción.

Palabras clave: reanálisis regional, reanálisis España, asimilación datos, ERA-5, CERRA.

ABSTRACT

The IBERA (IBERian ReAnalysis) project is a reanalysis initiative with a 2.5 km resolution that began in 2020, featuring a high resolution prototype based on HARMONIE-AROME and supplemented with an offline surface analysis. Currently, the initial prototype, which demonstrated added value compared to other available reanalysis, is being refined with an updated version of HARMONIE-AROME, an increase in the number of vertical levels considered and an expansion of the domain. Additionally, the number of observations used is being increased, and the inclusion of satellite and GPS GNSS *Zenit Total Delay* (ZTD) data is under consideration.

Initially, the reanalysis will cover the period from 1990 to 2024, with the intent to continue real-time production with an approximate two-months delay to optimize the reception and quality control of observations. Production is expected to be completed by the third quarter of 2026. Improvements are anticipated in the representation of small-scale phenomena, precipitation estimation, hydrological fields, and wind and solar energy. This report details the system configuration and specifies the observations used. Moreover, initial impact tests are presented, and the production plans are described.

Key words: regional reanalysis, Spain reanalysis, data assimilation, ERA-5, CERRA.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de datos de reanálisis está cada vez más extendido. Los reanálisis utilizan un modelo atmosférico de predicción para extender espacialmente la información que proporcionan las observaciones, lo cual aporta una estimación del estado de la atmósfera completa y físicamente consistente (Dee et al., 2014). La realización de estos reanálisis para tiempo pasado permite una recopilación más completa de observaciones, además de permitir un control de calidad de las observaciones más exhaustivo. Comparados con los modelos operativos, los reanálisis tienen la ventaja de que utilizan una versión fija del modelo para todo el periodo del reanálisis, lo que permite evaluar variaciones climáticas y facilita la calibración de modelos estadísticos. Por otra parte, en los últimos años se ha visto que estos datos sirven para entrenar los modelos de Inteligencia Artificial/ *Machine Learning* (IA/ML), cuya calidad está mejorando rápidamente (Bazile et al., 2017; Hersbach et al., 2020; Ridal et al., 2024).

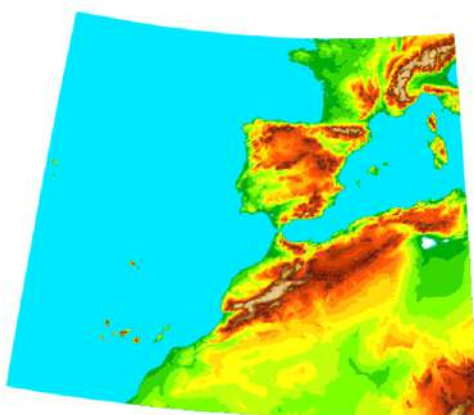


Figura 1: Dominio del reanálisis IBERA basado en el modelo HARMONIE-AROME a 2.5 km de resolución horizontal.

AEMET está desarrollando un reanálisis regional a una resolución de 2.5 km sobre un dominio que incluye la Península Ibérica, Baleares y las Islas Canarias (Fig. 1).

Reanálisis similares para otras regiones son CARRA y MERA (Gleeson et al., 2017; Køltzow et al., 2022). El reanálisis presentado se denomina IBERA (IBERian ReAnalysis). El plan es realizar análisis desde 1990 hasta la actualidad.

En la sección 2 de esta comunicación se describe la configuración del sistema, en la sección 3 se detallan las observaciones utilizadas, en la sección 4 se muestran las primeras pruebas de impacto, en la sección 5 se describen los planes de producción y se finaliza con las principales conclusiones.

2. CONFIGURACIÓN

El sistema está basado en el modelo HARMONIE-AROME (Bengtsson et al., 2018), que es una de las configuraciones posibles dentro del código compartido que desarrolla el consorcio ACCORD. Se utiliza la versión cy43h2.1 con 2.5 km de resolución horizontal, 90 niveles en la vertical y condiciones de contorno de ERA5 (Hersbach et al., 2020). Para el análisis de altura se utiliza un sistema 3DVar (Gustafsson et al., 2018). Además, el sistema es complementado con IBERA-Land, un análisis offline basado en el sistema de Interpolación óptima SPAN (Peral-García et al., 2017) que se utilizó para generar las rejillas ROCIO_IBEB de precipitación y temperaturas extremas desde 1951 hasta la actualidad y se encuentran disponibles en la web externa de AEMET. Este análisis offline permite el uso de una sintonización específica para nuestra región, poder incluir observaciones adicionales y extender las variables analizadas incluyendo temperaturas extremas y precipitación. El prototipo de este sistema fue descrito en Calvo et al. (2021).

3. USO DE OBSERVACIONES

Aparte de las observaciones convencionales (SYNOPS, TEMPS, Boyas y AMDAR), se está evaluando el impacto de incluir GPS GNSS Zenit Total Delay (ZTD) y observaciones de satélite. También se está trabajando en las funciones de estructura óptimas para extender la información de las observaciones en el proceso de análisis. En la Fig. 2 aparecen las observaciones utilizadas en el análisis de superficie de HARMONIE-AROME.

- Respecto a las observaciones utilizadas en las versiones operativas del modelo, se va a aumentar significativamente el número de observaciones de superficie incluyendo la red climatológica de AEMET (Banco Nacional de Datos Climatológicos).
- Probablemente también se dispondrá de las observaciones de las redes mesoescales de Meteo-France e IPMA (Portugal).

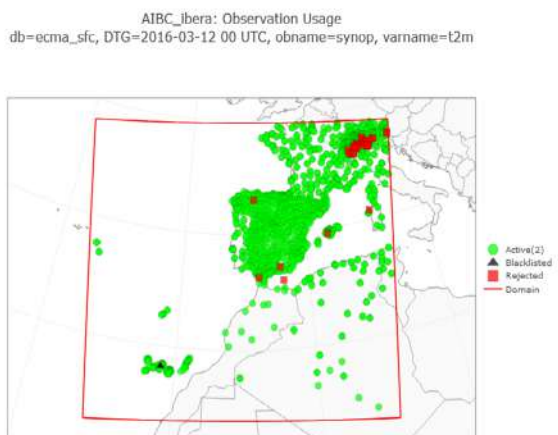


Figura 2: Observaciones utilizadas en el análisis de superficie de HARMONIE-AROME. En verde las observaciones activas.

El análisis de superficie *offline* utiliza observaciones adicionales de temperaturas extremas y precipitación cedidas por distintos Organismos (Fig. 3):

- Dirección General del Agua (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico), Sistemas Automáticos de Información Hidrológica (SAIH).
- Banco Nacional de Datos Climatológicos (BNDC, AEMET).
- Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SiAR; Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación).



Figura 3: Observaciones utilizadas en el análisis de superficie offline IBERA_Land para la precipitación. Las estaciones corresponden a BNDC (rojo), SiAR (negro) y SAIH (azul).

4. PRUEBAS DE IMPACTO

De acuerdo con los resultados de otros reanálisis, se estima que es necesario un periodo de warmup de un año aproximadamente para conseguir que los campos de superficie se equilibren. La comparación con otros reanálisis para un periodo de prueba (enero de 2016) muestran un claro valor añadido de IBERA (Fig. 4), pues los resultados son mejores cuando los puntos están más cerca de la diagonal. IBERA se ha comparado con los reanálisis: ERA5 (33km), UERRA (11km), UERRA-MESCAN (5.5km) e IBERA HARMONIE-AROME (2.5 km).

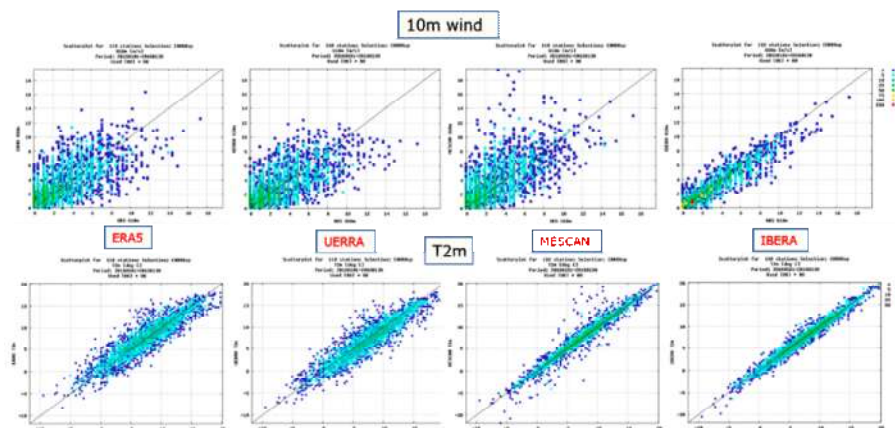


Figura 4: Scatterplots comparando diferentes reanálisis con observaciones SYNOPOS de viento a 10 m (fila superior) y temperatura a 2m (fila inferior). Se muestran los pares observación-análisis para distintos reanálisis: ERA5 (primera columna), UERRA (segunda columna), UERRA-MESCAN (tercera columna) e IBERA HARMONIE-AROME (cuarta columna).

Estos estudios de impacto fueron realizados con una versión inicial del sistema (Calvo et al., 2021). Los estudios de sensibilidad se están repitiendo para una configuración actualizada y con un dominio ampliado.

El valor añadido del análisis de superficie *offline* IBERA-Land puede verse en la Fig. 5, donde se muestra la verificación (*Equitable Thread Score*; ETS) de la precipitación en 24-horas utilizando observaciones independientes que no entraron en los análisis. Mayor ETS indica un mejor resultado. Se aprecia que IBERA-Land, utilizando como campo previo el reanálisis CERRA, es mejor que las salidas directas del reanálisis CERRA.

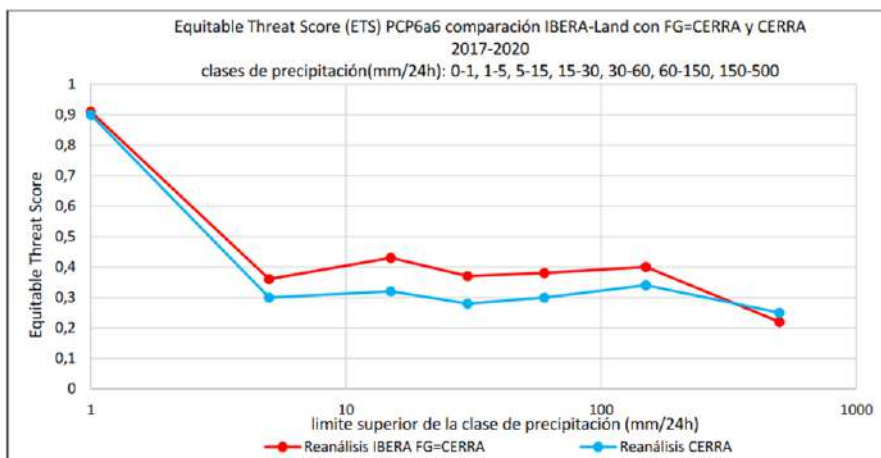


Figura 5: Equitable Threat Score de la precipitación acumulada en 24 horas para un periodo de 4 años (2017-2020). Comparación del reanálisis CERRA (azul) con las salidas de IBERA-Land utilizando como campo previo (FG) CERRA (rojo).

Variable	Sesgo	STDV
Precip. 06/06 UTC	0.2 mm	3.2 mm
Tmax	0.1 K	1.1 K
Tmin	0.8 K	1.8 K

Tabla 1: Validación de IBERA-Land, utilizando como campo previo el modelo HARMONIE-AROME, para la precipitación acumulada en 24h y temperaturas máxima y mínima diarias frente a un conjunto de observaciones independientes para enero de 2016. Índices de verificación: Sesgo (columna central) y Desviación estándar (STDV; columna derecha).

En la Tabla 1 se muestran los errores del prototipo de reanálisis IBERA-Land utilizando las predicciones de HARMONIE-AROME como campo previo para un mes de prueba (enero 2016). Esta verificación se ha hecho a partir de un conjunto de observaciones independientes, es decir, que no fueron asimiladas para la generación de dicho reanálisis.

5. PLAN DE PRODUCCIÓN

El plan de trabajo se esquematiza en la Fig. 6. Hasta el primer trimestre de 2025 se seguirá trabajando en la definición final de HARMONIE-AROME, así como del análisis de superficie *offline*. Además, se continuarán compilando y adecuando los formatos de distintos tipos de observaciones. Se espera que la producción comience en el segundo trimestre de 2025 y continúe hasta el tercer trimestre de 2026. El proceso de producción irá acompañado de un proceso de supervisión y control de calidad de las observaciones y los resultados. Posteriormente, se pretende seguir realizando el reanálisis en tiempo casi real con un retraso de 2 meses aproximadamente para maximizar la llegada y el control de calidad de las observaciones climatológicas.

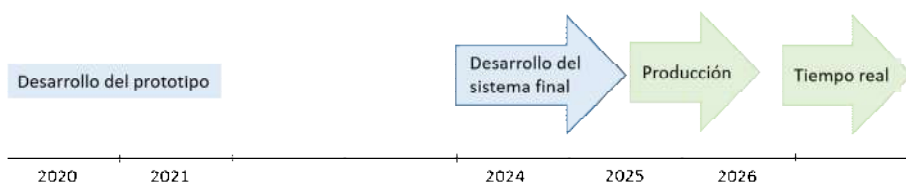


Figura 6: Plan para el desarrollo y producción del reanálisis IBERA.

Los resultados del reanálisis, tanto de IBERA como de IBERA-Land, se almacenarán en el sistema de archivo de AEMET y estarán a disposición de los usuarios que los reclamen según la Resolución de precios públicos de la Agencia Estatal de Meteorología vigente en el momento de la petición. Todavía no hay una decisión tomada respecto al formato en el que se salvarán los ficheros, la comunidad internacional usa el formato GRIB2, pero otros formatos pueden ser más adecuados para la comunidad de usuarios de datos de reanálisis para recuperar y usar los datos. Entre estos formatos cabe destacar ZAPP, que ha demostrado su eficacia en la recuperación de ficheros que contienen grandes volúmenes de datos.

6. CONCLUSIONES

El proyecto de reanálisis de 2.5 km de resolución empezó en 2020 con la configuración de un prototipo basado en HARMONIE-AROME, complementado con un análisis de superficie *offline*. El prototipo mostró muy buenos resultados con claro valor añadido respecto a otros reanálisis disponibles (Calvo et al., 2021). Durante el último año, la relevancia de los reanálisis de alta resolución ha aumentado con el auge de los modelos de IA/ML. Por lo tanto, el prototipo de reanálisis está siendo mejorado con una versión más reciente de HARMONIE-AROME, el aumento de niveles en la vertical, la ampliación del dominio del sistema para incluir Canarias y la sintonización específica para nuestro dominio. Además, se está incrementando el número de observaciones utilizadas y se está considerando la inclusión de datos de satélite y GPS GNSS ZTD.

El periodo inicial del reanálisis será 1990-2024 y se pretende continuar después en tiempo real con un retraso de unos 2 meses para maximizar la llegada y el control de calidad de las observaciones. Se estima que la producción esté terminada en el tercer trimestre de 2026. Se espera que el nuevo reanálisis mejore la representación de la pequeña escala y que permita mejorar las estimaciones de precipitación, campos hidrológicos y energía eólica y solar. Además, los reanálisis podrán ser utilizados para la evaluación y desarrollo de los modelos climáticos de alta resolución.

Este reanálisis estará integrado en un sistema de información climática regionalizada que AEMET podrá a disposición de todos los potenciales usuarios. El sistema en su conjunto dará soporte a múltiples servicios climáticos futuros, favoreciendo la reproducibilidad y reusabilidad de todos los desarrollos llevados a cabo con él.

AGRADECIMIENTOS

Nos gustaría agradecer a Xiaohua Yang, Swapan Mallick, Martin Ridal y Per Dalghren por su ayuda y sugerencias.

We would like to thank Xiaohua Yang, Swapan Mallick, Martin Ridal, Per Dalghren for their help and fruitful conversations.

Este trabajo de investigación ha sido financiado por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) y la Comisión Europea NextGenerationEU (Reglamento UE 2020/2094), a través de la Plataforma Temática Interdisciplinar Clima y Servicios Climáticos (PTI-Clima) del CSIC.

REFERENCIAS

- Bazile, E., Abida, R., Verelle, A., Le Moigne, P., & Szczypka, C. (2017). MESCANSURFEX surface analysis, deliverable D2. 8 of the UERRA project. *Final Report*.
- Bengtsson, L., Andrae, U., Aspelien, T., Batrak, Y., Calvo, J., de Rooy, W. et al. (2017) The Harmonie-AROME model configuration in the ALADIN-HIRLAM NWP system. *Monthly Weather Review*, 145, 1919–1935. Available from: <https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0417.1>
- Calvo J., Díez M., Escribà P., Jiménez A., Martín D., Morales G., Navascués B., Peral M., Sánchez-Arriola J. and Viana S. Prototype of a high resolution regional reanalysis for Iberian Peninsula and Balearic Islands (IBERA). *1st ACCORD All Staff Workshop*, 12-16 April 2021.
- Dee, D.P., Balmaseda, M., Balsamo, G., Simmons, R.E.A.J. & Thepaut, J.-N. (2014) Towards a consistent reanalysis of the climate system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95, 1235–1248.
- Gleeson, E., Whelan, E. & Hanley, J. (2017) Met Éireann high resolution reanalysis for Ireland. *Advances in Science and Research*, 14, 49–61
- Gustafsson, N., Janjić, T., Schraff, C., Leuenberger, D., Weissmann, M., Reich, H., ... & Fujita, T. (2018). Survey of data assimilation methods for convective-scale numerical weather prediction at operational centres. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 144(713), 1218-1256.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., ... & Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049.

Køltzow, M., Schyberg, H., Støylen, E. & Yang, X. (2022) Value of the Copernicus Arctic regional reanalysis (CARRA) in representing near-surface temperature and wind speed in the north-east Euro-pean Arctic. *Polar Research*, 41, 1–15.

Peral García, M. C., Navascués, B., & Ramos Calzado, P. (2017). Serie de precipitación diaria en rejilla con fines climáticos. https://www.aemet.es/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/detalles/NT_24_AEMET

Ridal, M., Bazile, E., Le Moigne, P., Randriamampianina, R., Schimanke, S., Andrae, U., ... & Wang, Z. Q. (2024). CERRA, the Copernicus European Regional Reanalysis system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. Doi: <https://doi.org/10.1002/gj.4764>

OCEANUCA: OPERATIONAL OCEANOGRAPHIC AND ATMOSPHERIC SYSTEM TO IMPROVE COASTAL OBSERVATION AND FORECASTING IN ANDALUCIA. WRF MODEL IMPLEMENTATION.

Juan. CARBONE¹, Jerimar VASQUEZ-ROJAS¹, Alfredo IZQUIERDO¹, Javier BENAVENTE², Jesús GÓMEZ-ENRI¹, Tomás FERNÁNDEZ-MONTBLANC², Carlos J. GONZÁLEZ¹, Flavio MARTINS³, William D. CABOS NARVAEZ⁴, Carlos YAGÜE⁵, Carlos ROMÁN-CASCÓN¹ y Oscar ÁLVAREZ¹.

¹ *Departamento de Física Aplicada, Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, INMAR, CEIMAR, Universidad de Cádiz, Puerto Real, 11510, Spain*

² *Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, INMAR, CEIMAR, Universidad de Cádiz, Puerto Real, 11510, Spain.*

³ *Center for Marine and Environmental Research (CIMA), University of Algarve, 8005-139 Faro, Portugal.*

⁴ *Departamento de Física y Matemáticas, Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, 28805, Spain.*

⁵ *Departamento de Física de la Tierra y Astrofísica, Universidad Complutense de Madrid, 28040, Madrid, Spain*

juan.carbone@uca.es

RESUMEN

El proyecto OceanUCA se enfoca en desarrollar una plataforma operativa destinada a optimizar las herramientas actuales creadas por la Universidad de Cádiz, integrando nuevos sistemas de observación y modelos numéricos de alta resolución, tanto atmosféricos como hidrodinámicos, configurados para alcanzar la máxima resolución a lo largo de la costa andaluza. Un elemento clave de esta plataforma es la implementación del modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF) en modo operativo, lo que permitirá automatizar los procesos de preprocesamiento y ejecución rutinaria para generar pronósticos atmosféricos detallados.

Este proyecto busca mejorar los recursos computacionales existentes para satisfacer las necesidades sociales, impulsado por el aumento de la resolución espacio-temporal de los modelos. Esto permitirá respuestas efectivas a desafíos ambientales costeros específicos, como derrames de petróleo, olas de calor marinas y atmosféricas, y el seguimiento de eventos extremos. El sistema tiene como objetivo detectar los efectos del cambio climático, potenciar la protección ambiental, facilitar la conservación de los recursos naturales, desarrollar productos de alerta temprana y mejorar las previsiones a corto, medio y largo plazo. Además, la plataforma permitirá un uso óptimo de los servicios ecosistémicos costeros y apoyará la toma de decisiones por parte de instituciones y partes interesadas mediante el monitoreo de los procesos marinos y atmosféricos en la región.

Palabras clave: meteorología, modelos, observaciones, oceanografía, sistemas operacionales.

ABSTRACT

The OceanUCA project focuses on developing an operational platform to enhance the current tools created by the University of Cádiz, integrating new observational systems and high-resolution numerical models (both atmospheric and hydrodynamic) configured to achieve maximum resolution along the Andalusian coast. A key component of this platform is the implementation of the Weather Research and Forecasting (WRF) model in operational mode, which will automate preprocessing and routine execution processes to produce detailed atmospheric forecasts.

The project will improve existing computational resources to address societal needs, driven by the increasing spatiotemporal resolution of the models, allowing for effective responses to specific coastal environmental challenges such as oil spills, marine and atmospheric heat waves, and extreme event tracking. This system aims to detect climate change effects, enhance environmental protection, facilitate natural resource conservation, develop early-warning products, and improve short, medium, and long-term forecasts. The platform will enable optimal use of coastal ecosystem services and assist decision-making by institutions and stakeholders through the monitoring of marine and atmospheric processes in the area.

Key words: meteorology, models, observations, oceanography, operational system.

1. INTRODUCTION

The Andalusian coast presents a complex and vulnerable hydrodynamic and topographical environment characterized by the influence of the Gibraltar Strait, important estuaries, coastal marshes, and other particularities. In terms of population, Spain has a settlement pattern on coastal areas, with 56% of the population being in the coastal zone, of which 28% of the population reside in cities in the coastal zone (de Andrés et al., 2017). Specifically, in Andalucía, the coastal zone represents the area with the highest population growth rates and, consequently, this is where the highest population densities originate. However, these areas are also exposed to overexploitation, oil spills, pollution due to industrial activities, and extreme weather events that can have devastating effects, with associated impacts on social welfare and the economy.

In this context, tools devoted to provide near real-time advice allow the design of useful contingency and emergency plans, while the user-friendly format of these tools favors the day-to-day use by society in general.

Among the environmental processes of interest in the area of study are the transport of sediments, pollutants, and oil spills, enhanced by the elevated marine traffic in some areas; the extreme-temperatures events (heat waves); the formation of coastal winds (breezes) that can mitigate these extreme temperatures; the occurrence of intense wind events (especially close to the Strait of Gibraltar and when low-pressure systems approach to the area); etc. All these processes are impacted by the sea dynamics and the interaction between the surface (ocean and coastal land) and the atmosphere (Román-Cascón et al., 2021).

The growing international focus on the sustainability of marine environments (United Nations' Sustainable Development Goal 14) underscores the need for user-friendly systems capable of delivering comprehensive information to a wide range of users. For example, in the case of an oil spill, rapid and precise actions are required to minimize environmental and socioeconomic impacts. Accurate predictions of surface currents and pollutant dispersion are crucial for planning effective responses (Abascal et al., 2016; Azevedo et al., 2017; González et al., 2019). Such responses involve coordination between public and private sectors, as well as technical experts, all of whom require operational tools to interpret the available information effectively. Therefore, an operational system that integrates numerical models and high-resolution observational data from monitoring stations, developed by experts in the field, is essential for supporting these decisions.

This operational system will provide an intuitive and accessible environment that offers both atmospheric and hydrodynamic information and data to institutions, research groups, and the general public. The results will be managed through an open, interactive software tool based on a GIS environment accessible via the web. In addition to developing the operational tool, the project aims to identify and involve users to understand their needs and co-design the platform, thereby ensuring a functional final product that is tailored to their specific requirements.

A key component of this operational system (OceanUCA) is the implementation of the WRF model in operational mode. This includes automating the preprocessing and routine execution processes of the WRF model to produce detailed atmospheric forecasts for the Andalusian region, providing critical insight into atmospheric and oceanographic interactions. The outputs from these simulations will feed into coupled hydrodynamical models and be made available to governmental institutions, emergency services, researchers, and other users. Through this system, the project aims to enhance the region's capacity to respond effectively to atmospheric and environmental events.

2. PROJECT DEVELOPMENT PLANNING

The main objective of this project is the adaptation and consolidation of an operational oceanographic and atmospheric system on the Andalusian coast (with the capacity for being extrapolated to other domains). This will allow us to respond to emergencies such as oil spills, castaways, or atmospheric and oceanographic physical events monitoring in a user-friendly format, providing open data to institutions, research institutions, and society, in general.

The planned system consists of a combination of services based on numerical model output and observational data, including 9 oceanographical models at high resolution (UCA 2D, 2.5D, 3D PdE IBI/MERCATOR, Nivmar, WAM, IH WWIII, SWAM, Ualg SOMA) and the atmospheric Weather Research and Forecasting (WRF) model (Fig. 1), whose operational and research use continues growing nowadays. The latter model incorporates different physical options (parameterizations) that are in continuous improvement by the scientific community. All the data from these models will need to be adapted and homogenized to the current output protocols for the interaction with the online application that will be developed.

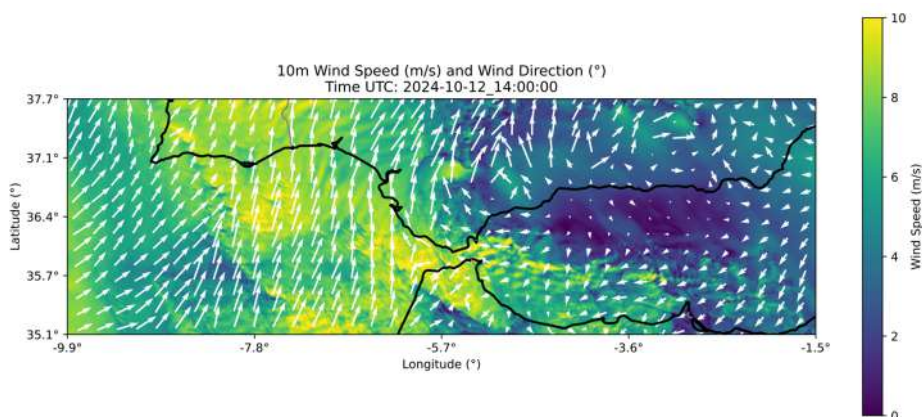


Fig. 1. Example of an atmospheric numerical output from the atmospheric Weather Research and Forecasting (WRF) model. In this case, the wind speed (colored contours, in m/s) and the wind direction (arrows, ° from North) are represented for the 12 of October 2024 at 14 UTC in the region of the Andalusian coast. Model simulations like this one will be included in the new platform, with updated and improved visualization tools to analyse the past, present and future conditions on the Andalusian coast. Additionally, numerical output from the atmospheric models (variables such as wind speed or wind direction) could be used as input for the hydrodynamical models.

Besides the models, the system will incorporate observational data from different sources: oceanographic buoys, satellite imagery, video-monitoring of beaches and dunes, meteorological weather stations (e.g., Fig. 2), surface fluxes instruments, high-frequency (HF) coastal radars, and all the data from the oceanographic and atmospheric field campaigns developed by different research groups. All these data and information will be incorporated into an interactive updated and state-of-the-art GIS tool. The combined use of models and observations will also allow the continuous model evaluation, interesting from the operational point of view but also, to provide feedback to the modeling community in charge of the model development and improvement.

The last step will be the implementation of the commented data into the different layers OceanUCA web environment (Fig. 3), adapted to the new computational needs, with greater calculation and data storage capacity.



Fig. 2. Example of coastal observations that will be included in the new OceanUCA platform. In this case, the picture shows a remote automatic weather station installed in Chipiona, providing real-time data on wind speed, wind direction, temperature, humidity, pressure, and downward short-wave radiation data. Besides, this station has a 3D sonic anemometer at its top to calculate turbulence and surface heat flux data directly from high-frequency measurements (10 Hz) through the Eddy-covariance technique. These types of observations will be also included in the system.

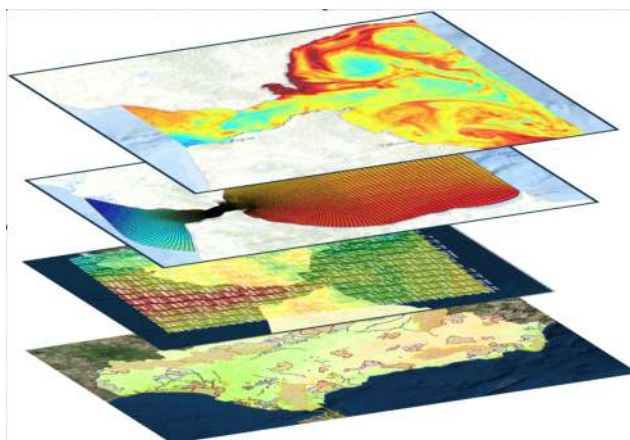


Fig. 3. Schematic representation of the idea of OceanUCA, incorporating different layers through Geographic Information System (GIS) tools that will be gathered in the website of the application that will be developed.

The last part of the project will be devoted to identifying final users, groups, and institutions (at the national and international level) through communication activities that include collaboration protocols and information sharing with third parties, as well as with other observatories. This will also include the direct transfer to society through outreach activities, including specialists and other interested users, due to the wide nature of the offered data.

3. WRF MODEL IMPLEMENTATION

One of the main objectives of the project is to implement the WRF model in operational mode, allowing to produce detailed forecasts for the area and to feed some of the hydrodynamical models.

To achieve this objective, both the preprocessing and routine execution processes of the WRF model will be automated. The model will be configured with a domain that covers the Andalusian region with a resolution of 3 km, including the adjacent seas. Additionally, a higher resolution domain (1 km) will be defined for the specific area covering the entire Andalusian coast (Fig. 1), allowing for a more detailed analysis of this critical zone. The most appropriate technical and physical configurations will be carefully studied and validated by the research team (Mulero et al., 2022; Román-Cascón et al., 2021).

This automated approach will generate numerical outputs that can be integrated into coupled models as well as directly into the operational system. These outputs will provide operational variables that will be made available to researchers, gubernamental institutions, emergency agencies, and external users. Additionally, the system will facilitate the storage of less common variables, which, due to their large size, will be housed on dedicated servers associated with the project and made accessible upon request.

The implementation of this system aims to improve the operational capacity to respond to atmospheric events.

4. SUMMARY AND CONCLUSIONS

The OceanUCA project aims to gather numerical model output and observational data in an updated, unified platform to provide current, past, and future information about the oceanographic and atmospheric state of the environment on the coast of Andalucía.

This system will allow for the observation and monitoring of oceanic and atmospheric coastal processes, as well as their forecasting and nowcasting. By providing an intuitive and accessible environment, OceanUCA will deliver both atmospheric and hydrodynamic information to institutions, research groups, and the general public. The results will be managed through an open, interactive tool based on a GIS environment, accessible via the web, allowing a wide range of users to engage with and utilize the data effectively.

Beyond the technical development, the project is committed to actively involving users to understand their needs, enabling a co-design process that ensures the final platform is functional and tailored to specific user requirements. The ultimate aim is

to establish a system that supports the development of early warning systems, natural resource surveillance, environmental protection, long-term climate change detection, and provides critical information for the decision-making of institutions that rely on this data.

ACKNOWLEDGEMENTS

OceanUCA (PCM_00032) is a project funded by the 2023 call for Marine Sciences I+D+i projects in the frame of: “Plan Complementario de Ciencias Marinas of Junta de Andalucía” and “Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia” (NextGenerationEU funding).

Some of the data that will be incorporated into the OceanUCA project will be gathered thanks to the WIND4US project (CNS2023-144885) (Disentangling the complexity of the WIND systems in coastal areas FOR a better Understanding of their impacts on Society), funded by Convocatoria 2023 de Proyectos de Consolidación Investigadora, as well as from the WINDABL project (PR2022-055) (How are the Surface Thermally Driven Winds influenced by the vertical structure and horizontal inhomogeneities of the Atmospheric Boundary Layer?), funded by Plan Propio de la Universidad de Cádiz, Convocatoria 2022 de Proyectos para investigadores noveles.

This work had the support of national funds through Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), under the project LA/P/0069/2020 granted to the Associate Laboratory ARNET <https://doi.org/10.54499/LA/P/0069/2020> and UID/00350/2020 CIMA <https://doi.org/10.54499/UIDB/00350/2020>

REFERENCES

- Abascal A. J., Castanedo S., Núñez P., Mellor A., Clements A., Pérez B., Cárdenas M., Chiri H., Medina R., (2016). A high-resolution operational forecast system for oil spill response in Belfast Lough. *Mar. Pollut. Bull.* 114, 302-314. doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.09.042.
- Azevedo A., Fortunato A. B., Epifânio B., Den Boer S., Oliveira E. R., Alves F. L., De Jesus G., Gomes J. L., Oliveira A., (2017). An oil risk management system based on high-resolution hazard and vulnerability calculations. *Ocean Coast. Manage.* 136, 1-18. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2016.11.014.
- de Andrés, M., Barragán, J. M., & Sanabria, J. G. (2017). Relationships between coastal urbanization and ecosystems in Spain. *Cities*, 68, 8-17.
- González, C. J., Reyes, E., Álvarez, Ó., Izquierdo, A., Bruno, M., & Mañanes, R., (2019). Surface currents and transport processes in the Strait of Gibraltar: Implications for modeling and management of pollutant spills. *Ocean & Coastal Management*, 179, 104869.
- Mulero-Martínez, R., Román-Cascón, C., Mañanes, R., Izquierdo, A., Bruno, M., & Gómez-Enri, J. (2022). The Use of Sentinel-3 Altimetry Data to Assess Wind Speed from the Weather Research and Forecasting (WRF) Model: Application over the Gulf of Cadiz. *Remote Sensing*, 14(16), 4036.

Román-Cascón, C., Lothon, M., Lohou, F., Hartogensis, O., Vila-Guerau de Arellano, J., Pino, D., Yagüe, C. & Pardyjak, E. R. (2021). Surface representation impacts on turbulent heat fluxes in the Weather Research and Forecasting (WRF) model (v. 4.1.3). *Geoscientific Model Development*, 14(6), 3939-3967.

DECARBONISING THE POWER SYSTEM IN SPAIN. AN ANALYSIS WITH HIGH SPATIO-TEMPORAL RESOLUTION

Cristobal GALLEGO-CASTILLO¹, Marta VICTORIA², Oscar LOPEZ-GARCIA¹ y Alvaro CUERVA-TEJERO¹

¹*Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeronáutica y del Espacio. Universidad Politécnica de Madrid.*

²*Department of Wind and Energy Systems. Technical University of Denmark.*

cristobaljose.gallego@upm.es, mvipe@dtu.dk, oscar.lopez.garcia@upm.es, alvaro.cuerva@upm.es.

RESUMEN

La descarbonización del sistema eléctrico requerirá un despliegue masivo de generación solar fotovoltaica y eólica, ambas caracterizadas por una importante variabilidad espacio-temporal. La modelización del sistema energético permite identificar combinaciones costo-efectivas de los elementos de un sistema eléctrico que garanticen la seguridad del suministro y unas bajas emisiones de CO₂. Este estudio investiga la relación entre el objetivo de reducción de emisiones de CO₂ considerado para el sector eléctrico y la configuración óptima del parque de generación renovable y almacenamiento para el caso de España. Para ello se emplea PyPSA-Spain, un modelo de código abierto basado en el modelo europeo PyPSA-Eur. Los resultados muestran una fuerte correlación entre la capacidad fotovoltaica necesaria y el objetivo de reducción de CO₂ considerado, una mayor idoneidad de la energía eólica para el balance espacial con países vecinos y el papel de las interconexiones para moderar las necesidades de nueva potencia renovable. Además, la alta resolución espacio-temporal del modelo permite obtener las necesidades de capacidad renovable a nivel NUTS 3 (provincias), lo que proporciona información valiosa para responsables políticos, autoridades locales y otros agentes sociales.

Palabras clave: modelado del sistema eléctrico, descarbonización, energías renovables, reanálisis atmosférico, economía de la energía, optimización.

ABSTRACT

Future decarbonised power systems will be based on large-scale deployment of solar and wind generation, both of which are characterised by significant spatio-temporal variability. Energy modelling plays a key role in identifying cost-effective generation mixes that ensure security of supply and low CO₂ emissions. This study investigates the impact of the CO₂ reduction target on the optimal configuration of renewable generation and storage for Spain. It uses PyPSA-Spain, an open-source model of the Spanish energy system based on the European model PyPSA-Eur. The results show a strong correlation between the required PV capacity and the CO₂ reduction target, a higher suitability of wind energy for spatial balancing with neighbouring countries, and the role of interconnections in reducing the required renewable generation

capacity. In addition, the high spatio-temporal resolution of the model allows detailed capacity requirements at the NUTS 3 level (provinces), providing valuable insights for policy makers, local authorities and other societal actors.

Key words: power system modelling, decarbonisation, renewable energy, atmospheric reanalysis, energy economics, optimisation.

1. INTRODUCTION

One of the most cost-effective actions to mitigate climate change in the short-term is the large-scale deployment of wind and solar PV capacity (IPCC, 2023). However, achieving high shares of renewable generation in a power system, where generation and consumption must be balanced at all times, poses new challenges for both system operation and system planning. The main reason for that is the variability of wind speed and solar radiation at different spatio-temporal scales. Several strategies are usually considered to balance variable renewable generation, the most important of which are: massive deployment of storage technologies (temporal balance), expansion of the transmission network capacity and interconnections with neighbouring countries (spatial balance), back-up generation (*e.g.* hydropower or combined cycle gas turbines, CCGT), demand-side management, and oversizing of renewable capacity. The above strategies are highly interconnected in the sense that increased investment in one of them can reduce the need for investment in the others. In this context, energy system models make it possible to analyse the interplay between the aforementioned elements, and to provide national policy-makers, local authorities and other societal actors with insights into cost-optimal configurations of a decarbonised and reliable power system. The implementation of such models requires skills and inputs from a range of disciplines, including meteorology, power system modelling, renewable generation technologies, energy economics and optimisation.

For the specific case of Spain, time-resolved analyses of the power system have been carried out in the past (Galbete, 2013), (Linares, 2017), (Greenpeace, 2018), (Victoria, 2019), (Gallego-Castillo, 2021), (Bonilla, 2022). At the governmental level, at least two relevant analyses have been performed: the one included in the Experts Commission on Energy Transition report commissioned by the Spanish government in 2017 (CETE, 2018) and the Spanish National Energy and Climate Plan (PNIEC by its Spanish acronym) (MITERD, 2024). All these studies are characterised by the adoption of the single-node hypothesis, which neglects the relevance of spatial resolution by assuming infinite capacity of the transmission network. According to the literature, this assumption has several limitations, such as overlooking the conflict between locating wind and PV plants in high resource areas or in areas that minimise the need for transmission grid expansion (Hörsch, 2017).

This work analyses the decarbonisation of the power system in Spain considering high spatio-temporal resolution. The impact of the CO₂ reduction target on the optimal mix is studied to provide insights into the role of each technology and their interaction for different stages of the decarbonisation process. In addition, two opposing scenarios are considered: one assumes an isolated power system, and the other includes

interconnections with the European power system optimised according to the decarbonisation targets set for 2030.

2. METHODS

The open-source model PyPSA-Spain (see reference in Supplementary Materials) has been used to obtain the optimal generation and storage capacity mixes for peninsular Spain under different decarbonisation scenarios. PyPSA-Spain is an extension of the European model PyPSA-Eur (Hörsch, 2018) that includes a number of specific functionalities to improve the representation of the Spanish power system.

The basic aspects of the power system model implemented in PyPSA-Eur are as follows: the model allows to obtain a clustered version of the high voltage transmission network for a predefined number of nodes. Several elements can be associated with each network node, where energy balance is imposed for every hour during a one year period: conventional and renewable generation capacity, storage capacity, electricity demand and transmission capacity with neighbouring nodes. A Voronoi cell is also associated with each node of the clustered network. It represents the spatial region closest to the node, and is used to estimate the renewable resource. In particular, hourly capacity factors for different renewable technologies (wind and solar PV) are estimated at each Voronoi cell, based on reanalysis data. Land availability in each Voronoi cell is obtained for specific CORINE land cover uses compatible with the deployment of renewable generation capacity, excluding Natura 2000 areas. The electricity demand associated with each node of the network is proportional to the national demand, according to the estimated population and GDP of the associated Voronoi cell. Based on techno-economic assumptions, an optimisation problem with constraints is defined to minimise the total annualised cost of the power system, including investment and operating costs of all elements (generation, storage and transmission grid). Long-term equilibrium is assumed, *i.e.* every investment cost is recovered over the lifetime of the associated asset. The constraints include, among others, security of supply (electricity demand is met every hour in every node) and a predefined CO₂ limit. The results of the optimisation comprise the optimal capacity for each technology at each node, and the optimal dispatch, see Supplementary note S15 in (Victoria, 2022) for a mathematical description of the objective functions and constraints.

The main functionalities implemented in PyPSA-Spain to improve the representation of the Spanish power system are: (i) an improved estimation of hourly renewable capacity factors based on a statistical correction (quantile-to-quantile) calibrated with historical data; (ii) the use of real time series of aggregated electricity demand at NUTS 3 level; (iii) the possibility to consider isolated system or with interconnections with Portugal and France. In the latter case, electricity exchanges are determined during the optimisation through price arbitrage. For this purpose, electricity prices for Portugal and France need to be provided as additional inputs.

In this work, the number of clusters was set at 100, which is considered to be high enough to represent the main aspects of the real high-voltage transmission network topology. Figure 1 shows the real (left) and the clustered (right) networks, together

with the corresponding Voronoi cells (onshore and offshore within the EEZ area). The meteorological data are taken from ERA 5 reanalysis (horizontal resolution of 0.25° , temporal resolution of 1 hour). Figure 2 shows the spatial distribution of the annual mean irradiance (left) and annual mean wind speed at 100 m (right).

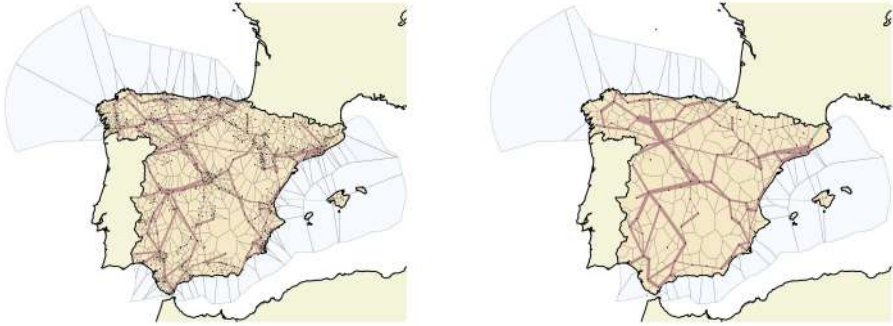


Fig. 1: Real high-voltage transmission network (left) and clustered network with 100 nodes (right), together with the corresponding Voronoi cells. Source: own elaboration.

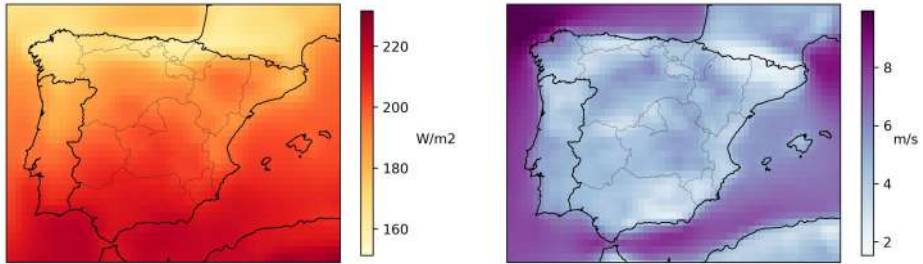


Fig. 2: Annual mean irradiance (left) and annual mean wind speed at 100 m (right). Source: own elaboration from ERA 5 reanalysis data.

The wind turbine models considered are Vestas V112 of 3 MW for onshore and the NREL Reference Turbine 2020ATB of 7 MW for floating offshore. For solar PV panels, a slope of 35° was considered. Storage technologies included in the model comprise batteries, electrolysers, fuel cells and underground H₂ storage. Conventional generation technologies included in the model comprise nuclear (3,112 MW, according to the Spanish nuclear decommissioning pathway for 2030), hydropower (14,965 GW with storage, 8,870 GW with pumped-storage and 277 MW run-of-river) and CCGT (capacity determined during the optimisation stage). The electricity demand for peninsular Spain was set at 344 TWh/year, in line with the 2030 scenario

considered in the PNIEC. It is important to note that this scenario assumes a strong electrification, with 50 TWh added to conventional electricity demand due to electric vehicles deployment and green H2 production. Hourly profiles for electricity demand correspond to real data from 2022 provided by Datadis, a platform created by the Spanish electricity distribution companies. To compute the annualised cost of the power system, a discount rate of 7% was assumed. As a conservative approach, the lifetime for wind turbines and solar PV panels was assumed to be of 20 years. Hourly electricity prices in Portugal and France were pre-calculated with PyPSA-Eur for a decarbonisation target of -70% in Europe, in line with the 2030 targets stated in the Fit for 55 package. Table 1 gathers the main investment cost assumptions.

Solar PV	440.0 EUR/kWe
Onshore wind power	1,095.8 EUR/kWe
Floating offshore wind power	2,350.0 EUR/kWe
Battery inverter	169.3 EUR/kWe
Battery storage	150.3 EUR/kWh
Electrolyser	1,500.0 EUR/kWe
Fuell cell	1,164.0 EUR/kWe
H2 underground storage	2.1 EUR/kWh

Table 1: Main investment cost assumptions. Source: <https://github.com/pypsa/technology-data>

3. RESULTS

The optimal generation and storage mix for peninsular Spain has been obtained for the isolated and interconnected with Portugal and France cases, and for different CO2 emission reduction targets for the power system between 50% to 98% with respect to 1990. To provide context, in 2023 the CO2 emission reduction of the power system was of approximately 62%, and the recently updated version of the Spanish National Energy and Climate Plan (PNIEC) sets a CO2 emission reduction of 82% with respect to 1990 by 2030.

3.1. Global results

Figure 3 shows, on the left, the optimal capacities for the isolated case (no interconnections with Portugal and France) for different CO2 reduction targets. On the right, results for the case considering interconnections with France and Portugal are illustrated.

For the isolated case, the optimal mix shows consistently increasing needs of solar PV capacity for higher CO2 reduction targets, while onshore wind capacity stabilises

beyond a 65% of CO₂ reduction. Beyond this limit, the deployment of wind capacity occurs mainly for floating offshore wind. This suggests a certain degree of competition between onshore and offshore wind, with capacity being deployed in an order determined by assumed costs, but not between solar and wind. The optimal capacity for batteries run in parallel with solar PV capacity. The optimal CCGT capacity decreases linearly with the CO₂ target, well below the actual capacity of approximately 25 GW.

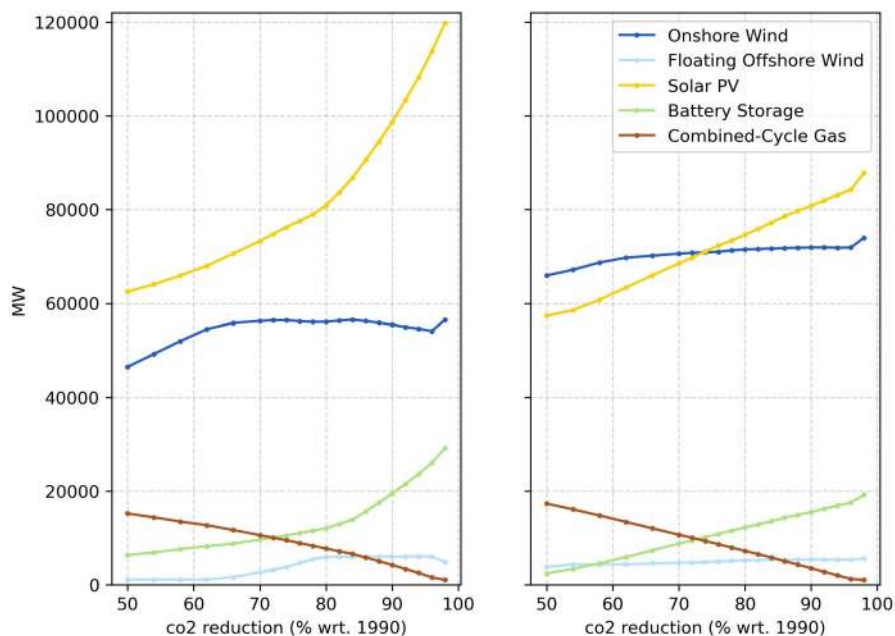


Fig. 3: Optimal capacity for different technologies and CO₂ reduction targets. Left: isolated power system. Right: Power system interconnected with France and Portugal. Source: own elaboration.

For the interconnected case, the main difference with respect to the isolated case is that a higher capacity is observed for onshore wind, and a more moderate increase in solar PV capacity is observed for high CO₂ targets. This suggests that wind energy is more likely to be balanced across countries than solar PV, which seems reasonable due to the lower spatial correlation of wind speed compared to solar irradiance. It is also observed that the total renewable capacity (solar PV and wind power) is lower in the interconnected case for high CO₂ targets than in the isolated case, highlighting the role of interconnections in reducing the required renewable generation capacity for the same CO₂ target.

Finally, it is worth noting that H₂ storage is not part of the optimal mix in any of the cases analysed, probably due to the low efficiency of the round-trip electricity-H₂-

electricity conversion process. This would probably not be the case if a H2 demand were considered together with the electricity demand.

3.2. Spatial distribution of renewable capacity

Figure 4 shows the spatial distribution of the optimal capacities for onshore wind (top left), floating offshore wind (top right), solar PV (bottom left) and batteries (bottom right), for a CO2 reduction target of 82% (as in the PNIEC) and for the interconnected case. This figure is obtained by aggregating the optimal capacities obtained for the 100 Voronoi cells at NUTS 3 level (provinces).

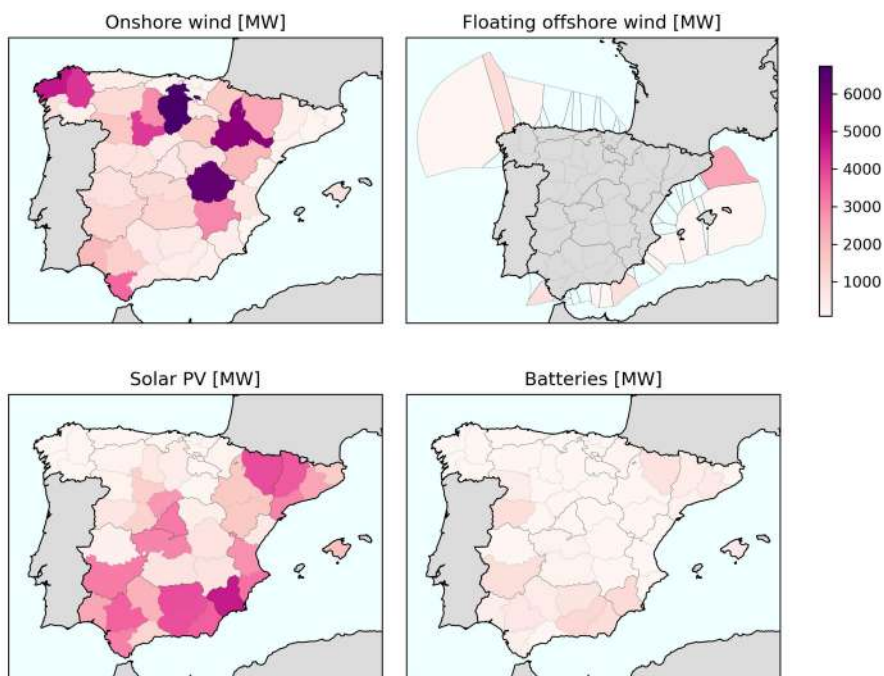


Fig. 4: Optimal capacity aggregated at NUTS 3 level (provinces), CO2 target of 82% wrt. 1990, interconnected case. Source: own elaboration.

It can be seen that onshore wind is the technology that tends to be more concentrated in certain regions, while solar PV capacity is generally more evenly distributed in southern regions. Interestingly, regions with high electricity demand, such as Madrid and Barcelona, or poorly interconnected (as the central part of the Pirenees, see figure 1) also have high solar capacity. Batteries are usually located together with solar PV capacity in order to use the surplus of solar generation during the day to meet electricity demand at night. Concerning floating offshore, specific optimal locations are identified in the map.

4. DISCUSSION

This work provides insights into the renewable and storage capacity requirements to meet different CO₂ reduction targets for the electricity sector. In general, the results obtained are in good agreement with the Spanish National Energy and Climate Plan (PNIEC), which foresees the need for a large-scale deployment of renewable generation in order to meet the climate targets. In particular, in order to maintain the actual 62% CO₂ reduction in the power sector by 2030 compared to 1990, the results obtained here for the interconnected case show that onshore wind capacity would need to increase from 31 GW to 70 GW and solar PV from 29 GW to 63 GW, while around 4 GW and 6 GW of new capacity would be needed for floating offshore wind and batteries respectively. This would be a consequence of the large increase in electricity demand due to electrification, which would reduce emissions in other sectors such as transport and industry. Increasing the CO₂ reduction target from the current 62% to the 82% envisaged in the PNIEC would require an additional 1.5 GW of onshore wind and 13 GW of solar PV, together with 1 GW of floating offshore and 6 GW of batteries. However, it is expected that extending the model with a coupled sector approach (particularly with electric vehicles) would reduce the required capacity for batteries.

The spatial resolution considered in PyPSA-Spain makes it possible to determine the shares of renewable energy and storage capacity required in the different regions of Spain. In this context, the notion of "optimal" is based solely on minimising the total system cost, but does not take into account issues related to public acceptance. Local resistance to the massive deployment of renewable energy is emerging as a potential problem in the energy transition process. The results obtained here could be used as a starting point for the discussion between global needs to decarbonise the Spanish power system, local impacts in specific regions, and required actions to minimise these impacts. Further developments of PyPSA-Spain will aim at analysing the impacts of a more even deployment of renewable capacity across the country.

Finally, in order to place the results obtained in context, the main limitations of this study are detailed: (i) electricity demand time series for 2030 are a re-scaled version of real data from 2022 to meet the assumed annual demand; however, the hourly profile between 2022 and 2030 is likely to change due to emerging electricity uses like the deployment of electric vehicles and green H₂ generation; (ii) No grid capacity expansion was considered; according to the literature, grid capacity expansion allows reducing grid bottlenecks, which usually leads to a better utilisation of high wind resources concentrated in specific areas; this could lead to a modified spatial layout of renewable capacity with respect to the obtained here; (iii) the optimisation process assumes perfect forecasting (the electricity demand and generation time series are known in advance for every hour of the year); therefore, the results obtained here represent the best scenario, especially in terms of optimal dispatch.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was funded by the Spanish Ministerio de Universidades, through the national mobility program of the Plan Estatal de Investigación Científica, Técnica y de Innovación 312021-2023, grant number CAS22/00069.

SUPPLEMENTARY MATERIALS

The code of PyPSA-Spain is available at: <https://github.com/cristobal-GC/pypsa-spain>, and related documentation can be found at: <https://pypsa-spain.readthedocs.io/en/latest/>. The figures in this paper were generated with pypsa-Xplore, an open set of Jupyter notebooks for exploring the objects generated with PyPSA-Spain and PyPSA-Eur, available at: <https://github.com/cristobal-GC/pypsa-Xplore>.

REFERENCES

- Bonilla et al. (2022). Feasibility and practical limits of full decarbonization of the electricity market with renewable energy: Application to the Spanish power sector. *Energy*, 2022, 239, 122437. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122437>
- CETE (2018). Análisis y propuestas para la descarbonización. Comisión de Expertos de Transición Energética, Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital. Available at: http://www6.mityc.es/aplicaciones/transicionenergetica/informe_cexpertos_20180402_veditado.pdf
- Galbete, S. (2013). Viabilidad técnico-económica para un suministro eléctrico 100% renovable en España. Tesis doctoral, Universidad Pública de Navarra.
- Gallego-Castillo, C. and Victoria, M. (2021). Improving Energy Transition Analysis Tool through Hydropower Statistical Modelling. *Energies*, 14, 98. doi: <https://doi.org/10.3390/en14010098>
- Greenpeace, 2018. Estudio técnico de viabilidad de escenarios de generación eléctrica en el medio plazo en España. Available at: https://es.greenpeace.org/es/wp-content/uploads/sites/3/2018/03/Generacion-Electrica_baja_5-03-2018.pdf
- Hörsch, J. and Brown, T. (2017). The role of spatial scale in joint optimisations of generation and transmission for European highly renewable scenarios. 14th International Conference on the European Energy Market (EEM), Dresden, Germany, 1–7. doi: <https://dx.doi.org/doi:10.1109/EEM.2017.7982024>
- Hörsch, J. et al. (2018). PyPSA-Eur: An open optimisation model of the European transmission system. *Energy Strategy Reviews*, 2018, 22, 207-215. doi: <https://dx.doi.org/doi:10.1016/j.esr.2018.08.012>
- IPCC (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. doi: <https://dx.doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Linares, P. et al. (2017) Escenarios para el sector energético en España 2030-2050. Economics for Energy e Instituto de Investigación Tecnológica (U. P. Comillas).
- MITERD (2024). Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Available at: https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/energia/files-1/pniec-2023-2030/PNIEC_2024_240924.pdf

Victoria, M. and Gallego-Castillo, C. (2019). Hourly-resolution analysis of electricity decarbonization in Spain (2017-2030). *Applied Energy*, 233-234, 674–690. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.055>

Victoria, M. et al. (2022). Speed of technological transformations required in Europe to achieve different climate goals. *Joule*, 6 (5), 1066–1086. doi: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.04.016>

DETERMINACIÓN DE LAS TEMPERATURAS DE DEFINICIÓN DE OLA DE CALOR EN ESPAÑA A NIVEL ISOCLIMÁTICO: EVOLUCIÓN TEMPORAL DE SU DURACIÓN E INTENSIDAD EN LA DÉCADA 2009-2018

José Antonio LOPEZ-BUENO¹, Paula ALONSO CARBAYO², Miguel Ángel NAVAS-MARTÍN¹, Isidro J MIRÓN³, Fernando BELDA ESPLUGUES⁴, Julio DÍAZ JIMÉNEZ¹ y Cristina LINARES GIL¹

¹Unidad de Referencia en Cambio Climático, Salud y Medio Ambiente Urbano. Instituto de Salud Carlos III.

²Hospital Severo Ochoa.

³Consejería de Sanidad de Castilla-La Mancha

⁴Agencia Estatal de Meteorología

jalopez@isciii.es, alonsocarbavopaula@gmail.com, manavas@isciii.es, jimiron@jccm.es, fbelda@aemet.es, j.diaz@isciii.es, clinares@isciii.es

RESUMEN

Métodos: se calculó la temperatura de definición de ola de calor (HW) epidemiológica (Threshold) en 182 zonas isoclimáticas (IZ) en España; usando como variable dependiente mortalidad diaria por causas naturales (CIE-X: A00-R99) durante el periodo 2009-2018 (INE), la variable independiente fue el valor medio de la temperatura máxima diaria (Tmax) de los meses estivales (AEMET). Mediante modelos Box-Jenkins se determinaron anomalías de mortalidad y estas se relacionaron con la Tmax para identificar las Threshold de HW. Se calculó el número e intensidad de HW en cada IZ, y se analizó su evolución temporal.

Resultados: en el 52.5% de las IZ la Threshold se encuentra por debajo del percentil 95; y solo coincide en el 30,7 % de los casos. La distribución geográfica de estos percentiles muestra una gran heterogeneidad en la relación temperatura-mortalidad. Las HW han aumentado de forma global en España a un ritmo de 3,9 HW/década, y su intensidad media anual en 9,5°C/década. Estos valores son superiores a los encontrados para las WH meteorológicas basadas en el percentil 95. El comportamiento geográfico por IZ de esta evolución temporal también es heterogéneo.

Conclusiones: la definición epidemiológica de HW captura con mayor precisión la evolución y variabilidad local de los riesgos en salud. Además, el uso de la definición climatológica podría estar minimizando los impactos en salud futuros de las HW.

Palabras clave: Planes de prevención, temperatura umbral, olas de calor, mortalidad, evolución temporal.

ABSTRACT

Methods: The epidemiological threshold temperature (Threshold) of the Heat Waves (HW) was estimated for 182 isoclimatic (IZ) areas of Spain. The dependent variable

was deaths by natural causes (CIE-X: A00-R99) during the period 2009-2018 (data source: INE) and the independent variable was the summer mean daily temperature (AEMET). Mortality anomalies were identified by Box-Jenkins methods and associated with Tmax to define the Threshold. Then, the frequency and intensity of HW were estimated and its temporal evolution was analysed.

Results: The 52.5% of the Thresholds were below of the 95 percentile, and only a 30.7% equals to it. The geographical distribution of these percentiles shows great heterogeneity in the temperature-mortality relationship. The HW globally increased in Spain at a rate of 3.9 HW/decade, and its annual mean intensity at a rate of 9.5°C/decade. These values are higher than those found with the meteorological definition of HW, based on the 95 percentiles. The geographical behavior of this temporal evolution is also heterogeneous.

Conclusions: The epidemiological definition of the HW captures with greater precision the local evolution and variability of the heat-health risks. Moreover, the 95 percentile definition might underestimate the future health impact of heat waves.

Keywords: Prevention plans, threshold temperature, heat waves, mortality, temporal evolution

1. INTRODUCCIÓN

Las olas de calor aumentan su frecuencia, intensidad y duración (IPCC, 2021), lo que convierte sus impactos en una prioridad clave para los sistemas de salud pública. Recientemente se han impulsado diversos estudios internacionales cuyo objetivo es identificar población vulnerable y mejorar la precisión geográfica de los planes de actuación en salud pública frente olas de calor (HW) (EPA, 2022). Existen numerosos factores locales que influyen en el impacto de las temperaturas extremas sobre la salud, no solo climáticos, sino también sociales y demográficos, como la estructura de la población, las infraestructuras, los servicios de salud disponibles, y el nivel socioeconómico, entre otros, que juegan un papel crucial en la modificación de los efectos del calor y en los procesos de adaptación (WHO, 2021). Ignorar la influencia de estos factores locales en la mortalidad atribuible al calor supone desatender la evidencia científica actual sobre el problema.

En 2015, el Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad (MSSSI) en España revisó el Plan de Prevención frente a altas temperaturas. La actualización incluyó la fijación de umbrales de HW basados en su impacto sobre la mortalidad (MSAN, 2023a), en lugar de basarse únicamente en criterios meteorológicos. Este Plan se fundamentaba en la determinación de una única temperatura máxima diaria a nivel provincial, que, al ser superada, desencadena el sistema de alerta en salud pública. No obstante, a pesar de los esfuerzos por mejorar la eficiencia del Plan, pocos estudios han analizado el impacto de los extremos térmicos a nivel menor del provincial. Sin embargo, dentro de una misma provincia pueden coexistir diversas condiciones climáticas, cuya evolución en el contexto climático actual puede variar significativamente.

Un estudio piloto llevado a cabo en Madrid (López-Bueno et al, 2021c, 2019) adoptó un enfoque diferente. En lugar de utilizar una única temperatura a nivel provincial, se

tomaron las tres regiones previamente delimitadas por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) para el Plan Nacional de Prevención y Vigilancia de Fenómenos Meteorológicos Adversos (Meteoalerta), cuya función es informar sobre la posible aparición de fenómenos meteorológicos adversos, y sobre su evolución una vez desarrollados. Estas “zonas isoclimáticas” (IZ) agrupan territorios homogéneos en términos de comportamiento climático de diversas variables meteorológicas. Los resultados de este análisis fueron muy positivos, observándose una disminución en las alertas emitidas y en las muertes atribuibles al calor.

No es común encontrar en la literatura científica estudios que analicen la mejora que conlleva aplicar planes de prevención frente a las olas de calor con un nivel de especificidad geográfica tan detallado. Sin embargo, en regiones como el sur de Europa, donde los fenómenos meteorológicos extremos se intensifican cada verano (MedECC, 2020), es esencial optimizar la eficacia de estos planes. La aplicación de esta zonificación para toda España permite emitir alertas en zonas más específicas solo cuando sea necesario, favoreciendo un sistema más racional y una mayor credibilidad de los esfuerzos de prevención.

El propósito de este estudio es, en consecuencia, establecer las temperaturas que definen las olas de calor y, por ende, la activación del Plan de Prevención ante altas temperaturas para las diversas zonas isoclimáticas (IZ) delineadas por los observatorios meteorológicos de AEMET en todo el territorio español. Además, se busca evaluar la evolución del número e intensidad de las olas de calor a lo largo de un periodo representativo, centrándose en los impactos en salud pública, en lugar de limitarse a un análisis puramente climatológico, que es lo habitual en este tipo de investigaciones.

2. MÉTODOS

Se ha realizado un estudio epidemiológico longitudinal de series temporales y diseño ecológico. Periodo: 1 de enero de 2009 hasta el 31 de diciembre de 2018. Las unidades muestrales fueron las zonas isoclimáticas (IZ) establecidas por AEMET para el sistema Meteoalerta, con fines de predicción meteorológica (Roldán et al, 2011), es decir, áreas homogéneas en términos climatológicos y, por tanto, con valor semejante, entre otros, de temperatura diaria.

2.1 Variables utilizadas

Se ha considerado como variable dependiente el recuento diario de defunciones por causas naturales (CIE-X: A00-R99) (MSAN, 2023b), suministrados por el Instituto Nacional de Estadística (INE), bajo acuerdo confidencial para la cesión de microdatos. Como variable independiente se empleó la temperatura máxima diaria media de todos los observatorios meteorológicos dentro de una misma IZ (Tmax). Se seleccionó la Tmax por su mejor relación estadística con la mortalidad estival (Díaz et al, 2015; Guo et al, 2017). Los datos fueron suministrados por AEMET.

Los valores missings fueron sustituidos mediante interpolación lineal o mediante predicción de modelo lineal ajustado por estacionalidad según se tratara de valores aislados o lagunas de mayor extensión. Cuando la proporción de valores ausentes excedía el umbral del 10%, las IZ fueron excluidas del análisis.

2.2 Determinación de la temperatura umbral de las zonas isoclimáticas (IZ)

Siguiendo la recomendación de la OMS (WHO, 2021), la temperatura umbral (Threshold) de HW se definió en cada zona mediante análisis epidemiológico de la asociación mortalidad-temperatura. Se utilizó metodología patentada por el Instituto de Salud Carlos III (Díaz et al, 2023), y establecida por el Ministerio de Sanidad (MSAN) para establecer las temperaturas umbrales de activación el Plan Nacional de Actuaciones Preventivas contra los efectos del exceso de temperatura en la salud (MSAN, 2023a). Además, existe una amplia literatura que detalla esta metodología (Díaz et al, 2015; Linares et al; 2014, Linares et al, 2015; López-Bueno et al, 2021a, 2021b).

El primer paso fue ajustar modelos Box-Jenkins de tipo ARIMA (Autorregresivo Integrado de Media Móvil) para la mortalidad en cada IZ (Box et al, 1994; Brockwell et al, 2016, Cowpertwait et al, 2009), controlando las variables de estacionalidad y tendencia. Este ajuste representa el comportamiento esperado de la serie basado únicamente en su historia. Por el contrario, la información de valores factores externos no incluidos en el modelo, como la temperatura, queda recogida en el comportamiento de los residuos del modelo (Barbieri et al, 2020). Así, se identificaron los valores de temperatura máxima diaria que se asocian estadísticamente con residuos de mortalidad diaria estadísticamente superiores a la media estacional para los meses de verano (JJAS).

Dado que la temperatura influye sobre la mortalidad en el corto plazo (Guo et al, 2017; Chien et al, 2016), se trabajó con la media móvil de las temperaturas en lugar que con las temperaturas en sí. La ventana de la media móvil fue los tres días anteriores a cada residuo observado (López-Bueno et al, 2022a). Después se determinó el error medio del modelo por intervalos solapantes de temperatura de dos en dos grados, cubriendo todo el rango de temperaturas. Estos valores residuales medios se representaron en diagramas cartesianos junto con sus intervalos de confianza bilaterales al 95% (López-Bueno et al, 2021a, 2021c). En estos diagramas, se identifican las temperaturas asociadas con residuos del modelo anormalmente elevados en función si los intervalos de confianza incluyen el valor medio de los residuos estivales.

Una vez determinada la Threshold de HW (°C), éstas no pueden compararse directamente entre sí debido a su dependencia de la climatología local (Guo et al, 2017; López-Bueno et al, 2021a). Por ello, se expresaron en percentil (Pthreshold) de temperatura máxima diaria estival para cada IZ. Cuando no fue identificada Threshold en una IZ, se asignó la temperatura de la IZ correspondiente de la Pthreshold provincial (MSAN, 2023a). Cuando no se disponía de Pthreshold provincial, se aplicó el percentil 95. Dónde no se disponía de datos de temperatura con porcentajes de missings inferiores al 10% no se definió ninguna temperatura umbral de HW.

Se empleó el software libre R.4.3.0 para el procesamiento y depuración de bases de datos y la determinación de temperaturas umbrales; y el software IBM SPSS Statistics 29.0.0.0. para el ajuste de modelos ARIMA.

2.3 Caracterización del número de olas de calor, intensidad media e intensidad anual de las olas de calor.

Se estableció la variable Tcal, a partir de las Thershold identificadas en cada IZ, de la siguiente manera:

- $T_{cal} = 0$ si $T_{max} \leq \text{Threshold}$
- $T_{cal} = T_{max} - \text{Threshold}$ si $T_{max} > \text{Threshold}$.

El número de días que se supera el umbral (Num) por año corresponde al número de casos en que T_{cal} es mayor que 0. Para calcular la intensidad media (Intmedia) de las olas de calor en un año, se considera el valor medio de T_{cal} en ese año ($^{\circ}\text{C}/\text{día}$), calculado para $T_{cal} > 0$. La intensidad total de las olas de calor (Inttotal) en un año se expresa como:

- $\text{Inttotal} = \text{Num} * \text{Intmedia}$, con la unidad en $^{\circ}\text{C}$.

Finalmente se determinaron los ritmos de cambio anuales o decenales mediante modelos lineales, que permiten una interpretación intuitiva de las pendientes.

3. RESULTADOS

La Figura 1 presenta la temperatura umbral (Threshold) para cada una de las zonas isoclimáticas (IZ). Las temperaturas umbrales oscilan entre $23,9^{\circ}\text{C}$, correspondiente al Litoral Occidental Asturiano, y $40,4^{\circ}\text{C}$, que se observa en la Campiña Cordobesa, lo que implica una diferencia notable de $16,5^{\circ}\text{C}$.

En la Figura 2 se muestran los percentiles ($P_{\text{threshold}}$) correspondientes a las temperaturas de la Figura 1. Estos varían entre el percentil 72, correspondiente al Litoral Sur de Alicante, y el percentil 98 para el Litoral Norte de Castellón, La Mancha Conquense, Las Palmas de Gran Canaria y Santa Cruz de Tenerife. Es importante resaltar que, si se hubiera utilizado el percentil 95 para definir la HW en el Litoral Sur de Alicante, se habría dejado de activar el Plan de Prevención ante olas de calor en un 23% de los días al año, lo que podría impactar negativamente en la salud de la población.

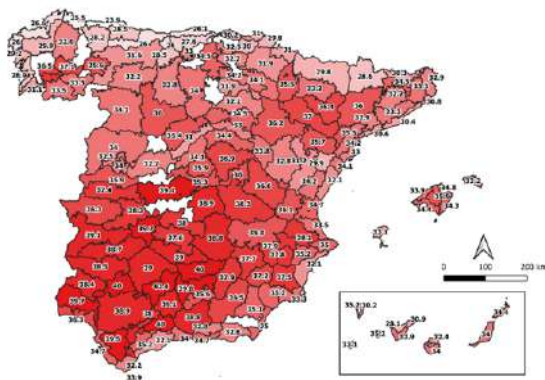


Figura 1. Mapa de las temperaturas umbrales para las diferentes regiones isoclimáticas de España.

En general, el 52,5% de las IZ, es decir, 85 zonas, tienen la Threshold por debajo del percentil 95, mientras que 16,7% se encuentra por encima. Solo en el 30,7% de las áreas (47 regiones) coincide el percentil con la definición meteorológica de HW.

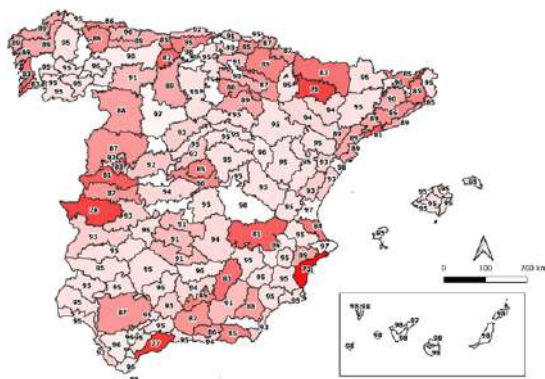


Figura 2. Percentiles a los que corresponden las temperaturas umbrales de cada región isoclimática en relación a la serie de temperaturas máximas de los meses de verano del periodo 2009-2018.

El número de HWs basadas en la definición epidemiológica ha aumentado en toda España en un promedio de 3,9 días (HWs/década). La intensidad media de cada día de HW ha crecido en 0,3 °C/día, y la intensidad anual ha incrementado en 9,5 °C. Todos estos incrementos son estadísticamente significativos con un nivel de $p < 0,05$. En la Tabla 1 se resumen los resultados agrupados para las 17 Comunidades Autónomas y para el conjunto de España, mostrando que este comportamiento es similar en todas, con incrementos en las tendencias de los tres parámetros analizados, excepto en las Islas Baleares, las Islas Canarias y las Comunidades de Murcia y Navarra, donde todas las tendencias están en decrecimiento. En la Comunidad Valenciana y en La Rioja, aunque no se observa un aumento en la intensidad media de las olas de calor, sí hay incrementos en el número de días de HW y en la intensidad anual.

La mayor variación en el número de días de HW se ha registrado en Castilla-La Mancha, con un incremento de 10 olas de calor al principio de la década en comparación con el final. En cuanto a la intensidad media de las olas de calor, Extremadura ha experimentado un aumento de 1,5 °C al final de la década. La mayor intensidad acumulada de olas de calor en un año se ha observado en Asturias, donde se han registrado incrementos en la intensidad media anual de hasta 20 °C.

Las Figuras 3a, 3b y 3c ilustran el comportamiento de las variaciones decenales en el número de días de HW y la intensidad media de estas olas. En el mapa de la Figura 3a, se observan incrementos más significativos en las zonas interiores de España. La Figura 3b muestra que la intensidad media de las olas de calor ha aumentado menos en los archipiélagos Balear y Canario, así como en el Levante español. Por último, la Figura 3c revela un comportamiento aún más heterogéneo en la intensidad anual de las olas de calor.

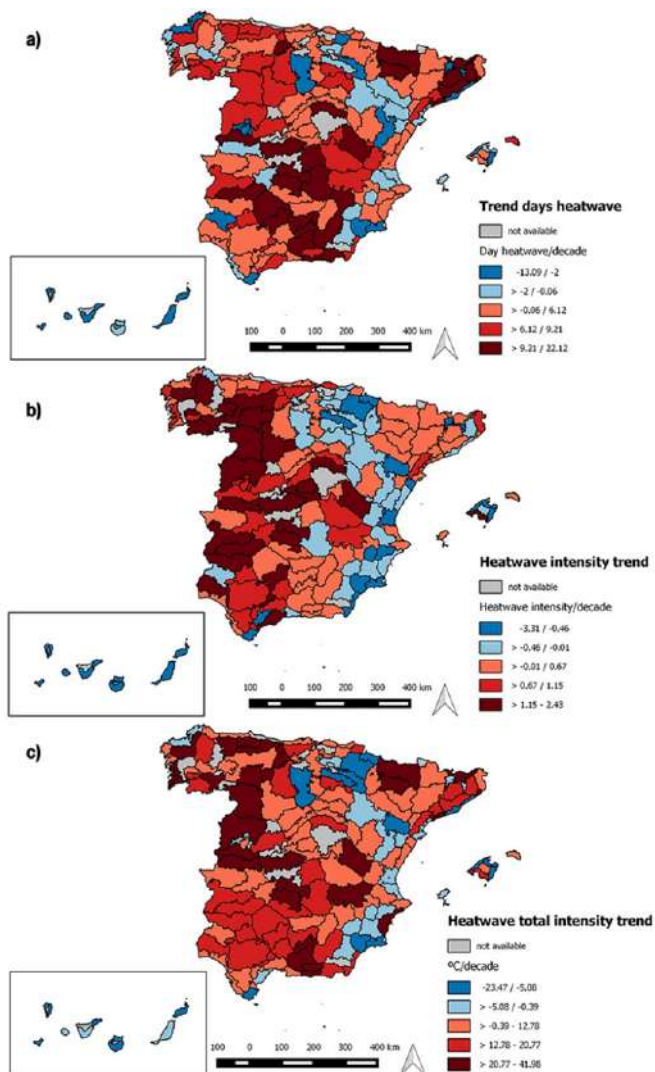


Figura 3. Evolución temporal de las olas de calor en días, intensidad y de la intensidad anual en el periodo 2009-2018

4. DISCUSIÓN

El conocimiento científico actual indica que el impacto de las olas de calor sobre la salud está influido por múltiples factores más allá de la intensidad de la HW (Díaz et al, 2006). Entre estos factores se incluyen variables socioeconómicas, como el nivel de renta (López-Bueno et al, 2020), características demográficas y vulnerabilidad de la población (Benmarhnia et al, 2015; Linares et al, 2016; Wei et al, 2019), y aspectos

como el entorno rural o urbano (López-Bueno et al, 2021a), la frecuencia de las olas de calor (López-Bueno et al, 2021a), la infraestructura urbana, la presencia de zonas verdes (Bundle et al, 2018) y la calidad de las viviendas (Buchin et al, 2016; Vellei et al, 2017; Flouris et al, 2018). Estos elementos locales pueden alterar el efecto de la temperatura en la mortalidad, lo que justifica que la definición de una HW no se base exclusivamente en un percentil meteorológico fijo para todas las zonas geográficas, ya que este enfoque ignora factores determinantes. La Organización Mundial de la Salud (OMS) subraya la importancia de considerar estos factores locales al implementar planes de prevención: “*Threshold levels should be based on health risks and not only on meteorological conditions*” (WHO, 2021).

Los resultados de este estudio realizado en España revelan que en el 52,6 % de los casos las temperaturas umbrales identificadas se encuentran por debajo el percentil 95 de las Tmax estivales, el cual se utiliza en la definición meteorológica de HW. Esto implica que no se activaría el Plan de Prevención en más de la mitad de las IZ de España cuando sería indicado desde una perspectiva sanitaria, desatendiendo casos de morbi-mortalidad evitable con la activación del plan (Tobias et al, 2012). Por otro lado, en las regiones donde los percentiles superan el 95, activar los planes de prevención basados en este percentil resultaría en un uso innecesario de recursos y posible pérdida de credibilidad del plan (Montero et al. 2010, 2013).

Este estudio también introduce un avance significativo en la implementación de los planes de prevención, al permitir la regionalización del plan a una escala geográfica inferior a la provincial, llegando a especificar hasta en cinco zonas la aplicación del plan para algunas provincias. Esto facilita la incorporación de factores locales que influyen considerablemente en el impacto de las HWs en la mortalidad (WHO, 2021). Así, un estudio realizado en la provincia de Madrid, que comparó la mortalidad evitable usando umbrales por debajo del nivel provincial entre 2000 y 2009, estimó que podrían haberse evitado 73 muertes (IC95%: 73-108), además de prevenir la emisión de 570 alertas innecesarias (Carmona et al, 2017).

Algunos estudios emplean percentiles fijos, como el 95, 97 o 99, para estimar el impacto de las temperaturas en la salud (Guo et al, 2017; Tobias et al, 2012) o para definir el calor extremo (salvador et al, 2023; Quijal-Zamorano et al, 2023). No obstante, utilizar un percentil fijo podría no reflejar con precisión la temperatura a la que realmente se presenta una HW desde el punto de vista sanitario, lo que introduce sesgos al comparar situaciones climáticas distintas.

El incremento observado en el número de días con olas de calor y el aumento en su intensidad media en España concuerdan con estudios que predicen un incremento en eventos meteorológicos extremos, con efectos significativos en la salud, tanto en el norte como en el sur de Europa. De hecho, se estima que fenómenos como la HW de 2003, que causó 70,000 muertes en Europa (Robine et al, 2008), podrían volverse el doble de frecuentes (Christidis et al, 2015). Desde el punto de vista meteorológico, las olas de calor en España han aumentado a un ritmo de tres días por década entre 1975 y 2019 (AEMET, 2023). Este estudio indica que las olas de calor con impacto en la salud están creciendo a un ritmo aún mayor (3,9 días por década), lo que sugiere que, al menos en España, las olas de calor definidas desde una perspectiva de salud están aumentando tanto en frecuencia como en intensidad.

Si estos resultados se confirman en otros lugares, los estudios que se basan en la evolución temporal de extremos térmicos definidos a partir de percentiles meteorológicos podrían estar subestimando el impacto del calor extremo en la salud humana.

La Tabla 1 y la Figura 3 muestran una notable heterogeneidad geográfica en España. En algunos lugares la tendencia de los tres parámetros analizados es claramente ascendente, mientras que en otros sucede lo contrario. Estos resultados confirman otros anteriores sobre proyecciones del impacto de las olas de calor en la mortalidad para el periodo 2021-2050 (Díaz et al, 2019). Por ejemplo, no se espera un aumento en la mortalidad en lugares como Murcia, Santa Cruz de Tenerife, Las Palmas y Baleares, que coinciden con las zonas en las que este estudio no ha detectado un incremento en el número de olas de calor.

Provincia	Número de Regiones Isoclimáticas	Tendencia decadal de los días de ola de calor (días)	Tendencia decadal de la intensidad media de las olas de calor (°C/día)	Tendencia decadal de la intensidad anual de las olas de calor (°C)
Andalucía	28	6*	0,4*	12,9*
Aragón	9	2	0,0	5,3
Asturias	4	7*	0,4*	20,0*
Islas Baleares	7	-4	-0,2	-2,1
Islas Canarias	10	-3*	-1,5*	-4,6
Cantabria	4	3*	0,5*	15,4
Castilla y León	19	4*	0,8*	12,0*
Castilla- La Mancha	15	10*	0,8*	15,7*
Cataluña	15	7*	0,2*	11,9*
Comunidad Valenciana	11	2*	-0,3	4,3*
Extremadura	8	5*	1,5*	18,1*
Galicia	13	4*	0,9*	16,0*
Madrid	3	1,3*	1,2*	1,1*
Murcia	5	-1,9	-0,6*	-6,4*
Navarra	4	-0,1	-0,3	-1,5
País Vasco	5	0,1	0,0	3,8*
La Rioja	2	3,4	-0,2	11,6*
Toda España	162	3,9	0,3	9,5

Tabla 1. Variaciones en la década 2009-2018 en el número de días de olas de calor, la intensidad media de las olas de calor y la intensidad anual de las olas de las olas de calor según las diferentes Comunidades Autónomas de España. Situación de las diferentes Comunidades Autónomas en España. *Incrementos/decrementos estadísticamente significativos.

La heterogeneidad en los percentiles y en la evolución temporal de las olas de calor está relacionada con la diversa vulnerabilidad al calor de las regiones españolas, influida por factores como el nivel de renta, la calidad de las viviendas, la frecuencia de las olas de calor, la estructura demográfica y el carácter rural o urbano de las zonas

(López-Bueno et al, 2021c). Esto enfatiza la necesidad de diseñar planes de prevención a escalas menores que la provincial. Además, los resultados obtenidos deben considerarse para priorizar las zonas donde es crucial reducir la vulnerabilidad ante las altas temperaturas y mejorar la adaptación a las olas de calor (López-Bueno et al, 2021c; Lorenzo et al, 2021; Navas-Martín et al, 2022).

Una limitación de este estudio radica en la imputación de valores faltantes mediante interpolación o modelos lineales, en lugar del método MICE, que podría ofrecer mayor precisión. Sin embargo, el método utilizado ya ha sido aplicado en otros estudios (López-Bueno et al, 2022b) y se considera adecuado dada la naturaleza de los datos. Otra posible fuente de sesgo proviene de la heterogeneidad en la ubicación de los observatorios meteorológicos, aunque esto se minimiza al promediar los valores de todos los observatorios en cada IZ. Además, como ocurre con estudios sobre contaminación, existe una limitación en la asignación precisa de la temperatura real a la que se expone la población, una limitación común en estudios ecológicos que dificulta la extrapolación de los resultados a nivel individual (Gelfand, 2010; Barceló et al, 2016).

4.1 Conclusiones

Este estudio demuestra que la definición de HW varía entre los enfoques de salud y meteorológicos, ya que responden a conceptos distintos. Mientras que la definición meteorológica se basa en percentiles (como el percentil 95), la definición de salud está relacionada con la temperatura a la que aumenta la mortalidad de manera significativa. Las olas de calor definidas desde la perspectiva de salud tienden a aumentar tanto en frecuencia como en intensidad a mayor ritmo que las olas de calor meteorológicas, lo que sugiere que utilizar solo la definición meteorológica puede subestimar los impactos del calor en la salud.

Además, la heterogeneidad en el comportamiento de las olas de calor en diferentes zonas pone de manifiesto la influencia de factores locales en la mortalidad, lo que refuerza la necesidad de activar planes de prevención a escalas más pequeñas que la provincial. Esto contribuiría a reducir tanto la mortalidad asociada al calor como la emisión de alertas innecesarias.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su gratitud al Instituto de Salud Carlos III (ISCIII) por su financiación de los proyectos ENPY 304/20, y ENPY 436/21

REFERENCIAS

- AEMET. (2023). Informe del estado del clima en España en 2022. Resumen ejecutivo. Recuperado de https://www.aemet.es/es/conocerlas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/detalles/informe_estado_clima
- Barbieri, C., & Bertini, I. (2020). Fundamentals of astronomy. doi: <https://doi.org/10.1201/9780429287305>

- Barceló, M. A., Varga, D., Tobias, A., Díaz, J., Linares, C., & Saez, M. (2016). Long term effects of traffic noise on mortality in the city of Barcelona, 2004–2007. *Environmental Research*, 147, 193–206. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.02.010>
- Benmarhnia, T., Deguen, S., Kaufman, J., & Smargiassi, A. (2015). Vulnerability to heat-related mortality: A systematic review, meta-analysis, and meta-regression analysis. *Epidemiology*, 26(6), 781–793. doi: 10.1097/EDE.0000000000000375
- Box, G. E., Jenkins, G. M., & Reinsel, G. C. (1994). *Time series analysis: Forecasting and control*. New Jersey (EEUU). Hall International.
- Brockwell, P. J., & Davis, R. A. (2016). *Introduction to time series and forecasting*. Cham: Springer International Publishing. Recuperado de <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-29854-2>
- Buchin, O., Hoelscher, M. T., Meier, F., Nehls, T., & Ziegler, F. (2016). Evaluation of the health-risk reduction potential of countermeasures to urban heat islands. *Energy and Buildings*, 114, 27–37. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.003>
- Bundle, N., O’Connell, E., O’Connor, N., & Bone, A. (2018). A public health needs assessment for domestic indoor overheating. *Public Health*, 161, 147–153. doi: <https://doi.org/10.1016/j.puhe.2017.12.016>
- Carmona, R., Linares, C., Ortiz, C., Mirón, I. J., Luna, M. Y., & Díaz, J. (2017). Spatial variability in threshold temperatures of heat wave mortality: impact assessment on prevention plans. *International Journal of Environmental Health Research*, 27(6). doi: <https://doi.org/10.1080/09603123.2017.1379056>
- Chien, L. C., Guo, Y., & Zhang, K. (2016). Spatiotemporal analysis of heat and heat wave effects on elderly mortality in Texas, 2006–2011. *Science of the Total Environment*, 562, 845–851. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.04.042
- Christidis, N., Jones, G. S., & Stott, P. A. (2015). Dramatically increasing chance of extremely hot summers since the 2003 European heatwave. *Nature Climate Change*, 5(1), 46–50. doi: <https://doi.org/10.1038/nclimate2468>
- Cowpertwait, P. S. P., & Metcalfe, A. V. (2009). *Introductory time series with R*. New York, NY: Springer New York. Recuperado de <http://link.springer.com/10.1007/978-0-387-88698-5>
- Díaz, J., Linares, C., & Tobias, A. (2006). Impact of extreme temperatures on daily mortality in Madrid (Spain) among the 45–64 age group. *International Journal of Biometeorology*, 50(6), 342–348. doi: 10.1007/s00484-006-0033-z
- Díaz, J., Carmona, R., & Linares, C. (2015). Temperaturas umbrales de disparo de la mortalidad atribuible al calor en España en el periodo 2000–2009. Recuperado de: <https://repisalud.isciii.es/entities/publication/7af5e7cf-9cec-4eb8-bf96-079d692ba667>
- Díaz, J., Carmona, R., Mirón, I., Ortiz, C., & Linares, C. (2015). Comparison of the effects of extreme temperatures on daily mortality in Madrid (Spain), by age group: The need for a cold wave prevention plan. *Environmental Research*, 143, 186–191. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.10.018>
- Díaz, J., Sáez, M., Carmona, R., Mirón, I. J., Barceló, M. A., Luna, M. Y., et al. (2019). Mortality attributable to high temperatures over the 2021–2050 and 2051–2100 time horizons in Spain: Adaptation and economic estimate. *Environmental Research*, 172, 475–485. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.02.041>

- Díaz, J., López-Bueno, J. A., & Linares, C. (2023). Patente: Determinación de los umbrales epidemiológicos de temperatura de definición de ola de calor y de ola de frío basados en la mortalidad diaria poblacional. Número de patente:16/2023/2287. EPA. (2022). Climate change and heat islands. Recuperado de <https://www.epa.gov/heatislands/climate-change-and-heat-islands>
- Flouris, A. D., McGinn, R., Poirier, M. P., Louie, J. C., Ioannou, L. G., Tsoutsoubi, L., et al. (2018). Screening criteria for increased susceptibility to heat stress during work or leisure in hot environments in healthy individuals aged 31–70 years. *Temperature*, 5(1), 86–99. doi: 10.1080/23328940.2017.1381800
- Gelfand, A. E. (2010). Misaligned spatial data: The change of support problem. En A. E. Gelfand, P. J. Diggle, M. Fuentes, & P. Guttorp (Eds.), *Handbook of Spatial Statistics*. Taylor & Francis.
- Guo, Y., Gasparrini, A., Armstrong, B. G., Tawatsupa, B., Tobias, A., Lavigne, E., et al. (2017). Heat wave and mortality: A multicountry, multicity study. *Environmental Health Perspectives*, 125(8), 087006. doi: 10.1289/EHP1026
- IPCC. (2023). Climate change 2021 – The physical science basis: Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Recuperado de <https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9781009157896/type/book>
- Quijal-Zamorano, M., Martínez-Solanas, È., Achebak, H., Petrova, D., Robine, J. M., Herrmann, F. R., et al. (2021). Seasonality reversal of temperature-attributable mortality projections due to previously unobserved extreme heat in Europe. *The Lancet Planetary Health*, 5(9), e573–e575. Recuperado de [https://www.thelancet.com/journals/lanplh/article/PIIS2542-5196\(21\)00211-4/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/lanplh/article/PIIS2542-5196(21)00211-4/fulltext)
- Linares, C., Mirón, I. J., Montero, J. C., Criado-Álvarez, J. J., Tobías, A., & Díaz, J. (2014). The time trend temperature–mortality as a factor of uncertainty analysis of impacts of future heat waves. *Environmental Health Perspectives*, 122(5), A118. doi: 10.1289/ehp.1308042
- Linares, C., Sánchez, R., Mirón, I. J., & Díaz, J. (2015). Has there been a decrease in mortality due to heat waves in Spain? Findings from a multicity case study. *Journal of Integrative Environmental Sciences*, 12(2), 153–163. doi: <https://doi.org/10.1080/1943815X.2015.1062032>
- Linares, C., Martínez-Martín, P., Rodríguez-Blázquez, C., Forjaz, M. J., Carmona, R., & Díaz, J. (2016). Effect of heat waves on morbidity and mortality due to Parkinson’s disease in Madrid: A time-series analysis. *Environment International*, 89–90, 1–6. doi: 10.1016/j.envint.2016.01.017
- López-Bueno, J. A., Díaz, J., & Linares, C. (2019). Differences in the impact of heat waves according to urban and peri-urban factors in Madrid. *International Journal of Biometeorology*, 63(3), 371–380. doi: <https://doi.org/10.1007/s00484-019-01670-9>
- López-Bueno, J. A., Díaz, J., Sánchez-Guevara, C., Sánchez-Martínez, G., Franco, M., Gullón, P., et al. (2020). The impact of heat waves on daily mortality in districts in Madrid: The effect of sociodemographic factors. *Environmental Research*, 190, 109993. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109993>
- López-Bueno, J. A., Navas-Martín, M. A., Díaz, J., Mirón, I. J., Luna, M. Y., Sánchez-Martínez, G., et al. (2021a). Analysis of vulnerability to heat in rural and urban areas

- in Spain: What factors explain heat's geographic behavior? *Environmental Research*, 112213. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112213>
- López-Bueno, J. A., Díaz, J., Follos, F., Vellón, J. M., Navas-Martín, M. A., Culqui, D., et al. (2021b). Evolution of the threshold temperature definition of a heat wave vs. evolution of the minimum mortality temperature: A case study in Spain during the 1983–2018 period. *Environmental Sciences Europe*, 33(1), 101. Doi: 10.1186/s12302-021-00542-7
- López-Bueno, J. A., Navas-Martín, M. A., Linares, C., Mirón, I. J., Luna, M. Y., Sánchez-Martínez, G., et al. (2021c). Analysis of the impact of heat waves on daily mortality in urban and rural areas in Madrid. *Environmental Research*, 110892. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110892>
- López-Bueno, J. A., Navas-Martín, M. A., Díaz, J., Mirón, I. J., Luna, M. Y., Sánchez-Martínez, G., et al. (2022a). Population vulnerability to extreme cold days in rural and urban municipalities in ten provinces in Spain. *Science of The Total Environment*, 852, 158165. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158165>
- López-Bueno, J. A., Navas-Martín, M. A., Díaz, J., Mirón, I. J., Luna, M. Y., Sánchez-Martínez, G., Culqui, D., & Linares, C. (2022b). Analysis of vulnerability to heat in rural and urban areas in Spain: What factors explain heat's geographic behavior? *Environmental Research*, 207, 112213. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112213>
- Lorenzo, N., Díaz-Poso, A., & Royé, D. (2021). Heatwave intensity on the Iberian Peninsula: Future climate projections. *Atmospheric Research*, 258, 105655. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105655>
- MedECC. (2020). Climate and environmental change in the Mediterranean Basin - Current situation and risks for the future: 1st Mediterranean Assessment Report. Mediterranean Experts on Climate and Environmental Change. Recuperado de <https://www.medecc.org/>
- Montero, J. C., Mirón, I. J., Criado, J. J., Linares, C., & Díaz, J. (2010). Comparison between two methods of defining heat waves: A retrospective study in Castile-La Mancha (Spain). *Science of the Total Environment*, 408(7), 1544–1550. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.01.013>
- Montero, J. C., Mirón, I. J., Criado, J. J., Linares, C., & Díaz, J. (2013). Difficulties of defining the term “heat wave” in public health. *International Journal of Environmental Health Research*, 23(5), 377–379. doi: <https://doi.org/10.1080/09603123.2012.733941>
- MSAN. (2023a). Plan nacional de actuaciones preventivas de los efectos del exceso de temperatura sobre la salud. Recuperado de https://www.sanidad.gob.es/ciudadanos/saludAmbLaboral/planAltasTemp/2023/Plan_nacional_actuaciones_preventivas.htm
- MSAN. (2023b). eCIE10ES: Edición electrónica de la CIE-10-ES. Recuperado de <https://eciemaps.mschs.gob.es/ecieMaps/browser/metabuscardor.html>
- Navas-Martín, M., López-Bueno, J. A., Díaz, J., Follos, F., Vellón, J., Mirón, I., et al. (2022). Effects of local factors on adaptation to heat in Spain (1983–2018). *Environmental Research*, 209, 112784. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112784>

- Roldán, E., Gómez, M., Pino, M. R., Esteban, M., & Díaz, J. (2011). Determinación de zonas isoclimáticas y selección de estaciones meteorológicas representativas en Aragón como base para la estimación del impacto del cambio climático sobre la posible relación entre la mortalidad y temperatura. *Revista Española de Salud Pública*, 85, 603–610. doi: 10.1590/S1135-57272011120000009
- Robine, J. M., Cheung, S. L. K., Le Roy, S., Van Oyen, H., Griffiths, C., Michel, J. P., et al. (2008). Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *Comptes Rendus Biologies*, 331(2), 171–178. doi: <https://doi.org/10.1016/j.crv.2007.12.001>
- Salvador, C., Gullón, P., Franco, M., & Vicedo-Cabrera, A. M. (2023). Heat-related first cardiovascular event incidence in the city of Madrid (Spain): Vulnerability assessment by demographic, socioeconomic, and health indicators. *Environmental Research*, 226, 115698. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115698>
- Tobias, A., Armstrong, B., Zuza, I., Gasparrini, A., Linares, C., & Díaz, J. (2012). Mortality on extreme heat days using official thresholds in Spain: A multi-city time series analysis. *BMC Public Health*, 12, 133. doi: <https://doi.org/10.1186/1471-2458-12-133>
- Vellei, M., Ramallo-González, A. P., Coley, D., Lee, J., Gabe-Thomas, E., Lovett, T., et al. (2017). Overheating in vulnerable and non-vulnerable households. *Building Research & Information*, 45(1-2), 102–118. doi: <https://doi.org/10.1080/09613218.2016.1222190>
- Wei, Y., Wang, Y., Lin, C. K., Yin, K., Yang, J., Shi, L., et al. (2019). Associations between seasonal temperature and dementia-associated hospitalizations in New England. *Environment International*, 126, 228–233. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.12.054>
- WHO. (2021). Heat and health in the WHO European Region: Updated evidence for effective prevention. Recuperado de <https://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/Climate-change/publications/2021/heat-and-health-in-the-who-european-region-updated-evidence-for-effective-prevention-2021>

EVOLUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LAS ISOBIOCLIMAS DE LA ESPAÑA PENINSULAR Y LAS ISLAS BALEARES (1953-2022)

Christian David LORENTE BLANCO¹, María José ESTRELA NAVARRO², David CORELL CUSTARDOY¹, Juan Javier MIRÓ PÉREZ² y David ORGAMBIDES GARCIA¹

¹ *Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica. Universidad de Valencia*

² *Departamento de Geografía. Universidad de Valencia.*

christian.lorente@uv.es, javier.miro-perez@uv.es, majoesda@uv.es,
david.corell@uv.es, orgarda@uv.es

RESUMEN

Este estudio analiza la evolución espacio-temporal de las isobioclimas en la España peninsular y las Islas Baleares durante un período de siete décadas (1953-2022), empleando para ello una extensa base de datos de 3.668 estaciones meteorológicas, y aplicando el sistema de clasificación bioclimática WBCS (Worldwide Bioclimatic Classification System). Los resultados revelan cambios significativos en la distribución de las isobioclimas, identificándose un total de 75 isobioclimas diferentes a lo largo del período de estudio. Se ha observado una intensificación del macrobioclima Mediterráneo, que incrementó su presencia del 62,43% al 69,36% de las estaciones, mientras que el macrobioclima Templado se redujo del 37,57% al 30,64%. El 52,37% de las estaciones experimentaron cambios en su isobioclima, identificándose 246 tipos diferentes de transiciones, con una distribución espacial heterogénea concentrada principalmente en la franja norte peninsular, el litoral mediterráneo y los sistemas montañosos. Las transiciones más frecuentes indican una tendencia hacia condiciones más cálidas y áridas, sugiriendo un proceso de mediterraneización del territorio. Estos cambios podrían tener importantes implicaciones para la conservación de los ecosistemas y la gestión de la biodiversidad en la región, especialmente en las zonas de transición entre macrobioclimas.

Palabras clave: Bioclimatología, Cambio Climático, Península Ibérica, Isobioclimas.

ABSTRACT

This study analyzes the spatio-temporal evolution of isobioclimates in peninsular Spain and the Balearic Islands over seven decades (1953-2022), using an extensive database of 3,668 weather stations, and applying the Worldwide Bioclimatic Classification System (WBCS). Results reveal significant changes in isobioclimatic distribution, with a total of 75 different isobioclimates identified throughout the study period. We observed an intensification of the Mediterranean macrobioclimate, which increased its presence from 62.43% to 69.36% of stations, while the Temperate macrobioclimate decreased from 37.57% to 30.64%. A total of 52.37% of stations experienced changes in their isobioclimate, with 246 different types of transitions identified, showing a heterogeneous spatial distribution mainly concentrated in the

northern peninsular fringe, the Mediterranean coastline, and mountain systems. The most frequent transitions indicate a trend towards warmer and more arid conditions, suggesting a process of mediterraneization across the territory. These changes could have significant implications for ecosystem conservation and biodiversity management in the region, particularly in transition zones between macrobioclimates.

Keywords: Bioclimatology, Climate Change, Iberian Peninsula, Isobioclimates.

1. INTRODUCCIÓN

La Península Ibérica y las Islas Baleares, debido a su ubicación geográfica y características climáticas, se consideran regiones vulnerables al cambio climático. Situadas en la transición entre las zonas templadas y subtropicales, y con una orografía compleja, estas áreas experimentan una alta variabilidad climática que las hace sensibles a pequeñas alteraciones en los parámetros climáticos. Estudios recientes en esta región indican tendencias hacia la aridificación (Claro *et al.*, 2023), disminución de las precipitaciones (Páscoa *et al.*, 2021) y aumento de las temperaturas (Sandonis *et al.*, 2021), lo que podría exacerbar fenómenos como la pérdida de biodiversidad. En este escenario, el análisis de las isobioclimas se presenta como una herramienta valiosa para evaluar y monitorear los impactos del cambio en la región.

Dentro de la clasificación bioclimática definida por Rivas-Martínez *et al.* (2011), la *Worldwide Bioclimatic Classification System* (WBCS), las isobioclimas proporcionan una caracterización holística de las condiciones climáticas al integrar en sí mismas varias unidades bioclimáticas. Su estudio permite identificar tanto cambios climáticos como inferir las posibles respuestas de los ecosistemas a dichas alteraciones.

En la última década se ha producido una aceleración de los indicadores de cambio climático, con nuevos récords de temperaturas globales y eventos extremos. En la Península Ibérica, estos cambios se han manifestado en forma de sequías prolongadas, olas de calor más frecuentes e intensas, y alteraciones en los patrones de precipitación (AEMET, 2020). Estos fenómenos subrayan la necesidad de actualizar los estudios previos sobre la evolución de las isobioclimas en esta región. La rápida evolución del clima en la última década sugiere que los patrones bioclimáticos podrían haber experimentado cambios desde entonces. En este contexto, el presente estudio se propone analizar la evolución espacial y temporal de las isobioclimas de la región peninsular española y de las Islas Baleares para un período de siete décadas, empleando datos climáticos actualizados hasta el año 2022.

2. MÉTODOS

2.1. Área de Estudio

La región de estudio engloba la España peninsular y las Islas Baleares, abarcando un área total de aproximadamente 498.884 km². La Península Ibérica se caracteriza por una marcada heterogeneidad geográfica y climática, fruto de su posición entre el Océano Atlántico y el Mar Mediterráneo, su proximidad al continente africano y su orografía compleja, la cual incluye sistemas montañosos significativos como los Pirineos, la Cordillera Cantábrica o el Sistema Central, entre otros. Esta variedad

topográfica y geográfica genera una gran diversidad de bioclimas y, consecuentemente, una rica variedad de ecosistemas. Por su parte, las Islas Baleares, debido a su carácter insular y variedad de microclimas, poseen una gran biodiversidad taxonómica y filogenética dentro de la región mediterránea, destacando sus regiones montañosas. Desde una perspectiva bioclimática, el área de estudio presenta dos macrobioclimas: el Mediterráneo y el Templado (Rivas-Martínez *et al.*, 2017).

2.2. Base de datos, Período de estudio y Tratamiento de datos

Para llevar a cabo este estudio se ha empleado una extensa base de datos climáticos compuesta por registros diarios de temperaturas mínimas (°C), temperaturas máximas (°C) y precipitación (mm), procedentes de un total de 3.668 estaciones meteorológicas distribuidas en el territorio, obteniendo con ello una densidad media aproximada de una estación por cada 136 km². De estas estaciones, 3.616 pertenecen a la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), y 52 a la Asociación Valenciana de Meteorología (AVAMET). Estos datos abarcaron un período comprendido entre 1953 y 2022. Dicho intervalo se dividió en dos subperíodos de 35 años cada uno (1953-1987 y 1988-2022) con el fin de realizar análisis comparativo de la evolución de las isobioclimas.

Para garantizar la calidad y coherencia temporal de los datos, se implementó un riguroso proceso de control y homogeneización. Se seleccionaron estaciones con más de 8 años completos de observaciones originales, aplicando a continuación técnicas estadísticas basadas en el enfoque NLPCA-EOF-QM para completar las lagunas de datos, siguiendo la metodología descrita por Miró *et al.* (2017). Sin embargo, para las temperaturas, el proceso de llenado de datos con mejor rendimiento fue VBPCA-QM, el cual también se describe entre los probados por Miró *et al.* (2017). Así mismo, para garantizar la homogeneidad temporal de las series temporales obtenidas, se aplicó el método ACMANT, desarrollado por Domonkos (2014, 2015).

2.3. Metodología empleada

Para llevar a cabo este estudio se empleó el sistema de clasificación bioclimática definido por Rivas-Martínez *et al.* (2011): la WBCS. Dicho sistema, al integrar conceptos de climatología, ecología y biogeografía, constituye una robusta herramienta para la caracterización bioclimática de los territorios. Dentro de la WBCS, las isobioclimas representan unidades bioclimáticas sintéticas que integran el macrobioclima, el bioclima, la variante bioclimática, el termotipo y el ombrotipo, definiendo así espacios ambientales homogéneos capaces de albergar series de vegetación específicas. Dentro del área de estudio, se identifican los macrobioclimas Mediterráneo y Templado; sin embargo, como el nombre del bioclima incluye siempre el de su respectivo macrobioclima, no hace falta repetirlo al nombrar la correspondiente isobioclima. Por tanto, la estructura de identificación de una isobioclima es la siguiente: bioclima – variante bioclimática – termotipo – ombrotipo. El cálculo de estas unidades bioclimáticas implica la recopilación de datos climáticos mensuales de temperatura y precipitación, el cómputo de índices bioclimáticos como el índice de termicidad compensado (Itc) y el índice ombrotérmico anual (Io), y la determinación sucesiva y secuencial de las correspondientes unidades que componen cada isobioclima. La metodología de obtención de las correspondientes unidades bioclimáticas requeridas se detalla en Rivas-Martínez *et al.* (2011).

Los bioclimas identificados en este estudio han sido los siguientes: mediterráneo pluviestacional oceánico (mepo), mediterráneo pluviestacional continental (mepc), mediterráneo xérico oceánico (mexo), mediterráneo xérico continental (mexc), mediterráneo desértico oceánico (medo), mediterráneo desértico continental (medc), templado hipoceánico (teho), templado oceánico (teoc), templado continental (teco), templado xérico (texe). Las variantes bioclimáticas identificadas en este estudio han sido las siguientes: normal (nrm), submediterránea (sbm) y esteparia (stp). Los termotipos identificados en este estudio han sido los siguientes: inframediterráneo (ime), termomediterráneo (tme), mesomediterráneo (mme), supramediterráneo (sme), oromediterráneo (ome), infratemplado (ite), termotemplado (tte), mesotemplado (mte), supratemplado (ste) y orotemplado (ote). Los ombrotipos identificados en este estudio han sido los siguientes: árido (ar), semiárido (sa), seco (se), subhúmedo (su), húmedo (hu), hiperhúmedo (hh) y ultrahiperhúmedo (uhu).

3. RESULTADOS

En la tabla 1 pueden observarse las diferentes isobioclimas presentes en el área de estudio a lo largo de los dos periodos de tiempo definidos. Se identificaron un total de 75 isobioclimas, de las cuales 61 estuvieron presentes en el período 1953-1987, y 66 en el período 1988-2022. Durante el primer período, el macrobioclima Mediterráneo fue el dominante, presentando 22 isobioclimas, y abarcando el 62,43% de las estaciones meteorológicas (2.290 estaciones). Por su parte, el macrobioclima Templado presentó 39 isobioclimas, las cuales ocupaban el 37,57% de las estaciones restantes (1.378 estaciones). La dominancia del macrobioclima Mediterráneo se intensificó durante el segundo período, ocupando el 69,36% de las estaciones meteorológicas (2.544 estaciones). Las isobioclimas mediterráneas identificadas pasaron de 22 a 32, lo que supuso un aumento relativo del 45,45%. En contraposición, el macrobioclima Templado presentó 34 isobioclimas, lo que implicó una disminución relativa de las isobioclimas templadas en un 12,8%. Como consecuencia, el macrobioclima Templado pasó a ocupar el 30,64% de las estaciones (1.124 estaciones) durante el segundo período. Por tanto, a lo largo del período de estudio, el macrobioclima Mediterráneo aumentó su ocupación relativa de estaciones en un 11,11%, mientras que en el macrobioclima Templado esta disminuyó un 18,43%.

Isobioclima	1953-1987 (Nº de estaciones)	1988-2022 (Nº de estaciones)	Diferencia (Nº de estaciones)	1953-1987 (% de estaciones)	1988-2022 (% de estaciones)
(1) mepo - nrm - mme - se	843	728	-115	22,98	19,85
(2) mepo - nrm - tme - se	430	521	91	11,72	14,2
(3) teoc - sbm - mte - su	209	209	0	5,7	5,7
(4) mepo - nrm - mme - su	198	235	37	5,4	6,41
(5) teoc - sbm - ste - hu	170	143	-27	4,63	3,9
(6) mepo - nrm - sme - se	170	99	-71	4,63	2,7
(7) teoc - sbm - mte - hu	161	175	14	4,39	4,77
(8) mexo - nrm - tme - sa	153	263	110	4,17	7,17
(9) teoc - sbm - ste - su	134	72	-62	3,65	1,96
(10) teho - sbm - tte - hu	120	22	-98	3,27	0,6
(11) mexo - nrm - mme - sa	112	105	-7	3,05	2,86
(12) mepo - nrm - sme - su	111	119	8	3,03	3,24

(13) mepo - stp - mme - se	97	84	-13	2,64	2,29
(14) texe - sbm - mte - se	97	28	-69	2,64	0,76
(15) mepo - nrm - tme - su	58	37	-21	1,58	1,01
(16) teoc - nrm - ste - hu	51	40	-11	1,39	1,09
(17) teoc - nrm - mte - hu	43	42	-1	1,17	1,15
(18) texe - sbm - ste - se	34	2	-32	0,93	0,05
(19) teho - sbm - mte - hu	34	2	-32	0,93	0,05
(20) mepo - nrm - mme - hu	33	31	-2	0,9	0,85
(21) teoc - nrm - ste - hh	33	25	-8	0,9	0,68
(22) teoc - sbm - ste - hh	32	29	-3	0,87	0,79
(23) teoc - nrm - ote - hh	29	12	-17	0,79	0,33
(24) texe - sbm - tte - se	28	6	-22	0,76	0,16
(25) teoc - sbm - tte - su	27	67	40	0,74	1,83
(26) teoc - sbm - tte - hu	24	98	74	0,65	2,67
(27) teoc - nrm - mte - hh	23	20	-3	0,63	0,55
(28) teoc - nrm - tte - hu	18	55	37	0,49	1,5
(29) teho - sbm - tte - su	17	39	22	0,46	1,06
(30) mepo - stp - sme - se	17	3	-14	0,46	0,08
(31) mexo - stp - mme - sa	16	11	-5	0,44	0,3
(32) teho - nrm - tte - hu	16	2	-14	0,44	0,05
(33) teoc - sbm - mte - hh	13	7	-6	0,35	0,19
(34) medo - nrm - tme - ar	12	15	3	0,33	0,41
(35) teho - nrm - mte - hu	12	0	-12	0,33	0
(36) teho - sbm - mte - hh	11	0	-11	0,3	0
(37) mepc - nrm - mme - se	9	111	102	0,25	3,03
(38) teho - nrm - mte - hh	9	2	-7	0,25	0,05
(39) teoc - sbm - ote - hh	8	3	-5	0,22	0,08
(40) mexo - nrm - ime - sa	7	19	12	0,19	0,52
(41) mepo - nrm - ime - se	6	13	7	0,16	0,35
(42) mepo - nrm - sme - hu	6	13	7	0,16	0,35
(43) teho - nrm - tte - hh	4	0	-4	0,11	0
(44) mepc - nrm - mme - su	3	13	10	0,08	0,35
(45) medo - nrm - ime - ar	3	13	10	0,08	0,35
(46) mepc - stp - mme - se	2	10	8	0,05	0,27
(47) mexc - stp - mme - sa	2	8	6	0,05	0,22
(48) teoc - stp - mte - su	2	2	0	0,05	0,05
(49) teoc - nrm - ste - su	2	1	-1	0,05	0,03
(50) teoc - nrm - ste - uhu	2	1	-1	0,05	0,03
(51) teho - sbm - mte - su	2	1	-1	0,05	0,03
(52) teoc - stp - ste - su	2	0	-2	0,05	0
(53) teoc - sbm - ote - hu	2	0	-2	0,05	0
(54) teho - sbm - tte - hh	2	0	-2	0,05	0
(55) teho - nrm - ste - hh	2	0	-2	0,05	0
(56) mepo - nrm - ime - su	2	0	-2	0,05	0
(57) teoc - nrm - mte - su	1	8	7	0,03	0,22
(58) teoc - nrm - ote - uhu	1	2	1	0,03	0,05
(59) teoc - nrm - ote - hu	1	2	1	0,03	0,05
(60) teho - nrm - ste - hu	1	1	0	0,03	0,03
(61) teoc - sbm - ote - su	1	0	-1	0,03	0
(62) mexc - nrm - mme - sa	0	50	50	0	1,36
(63) mepo - stp - mme - su	0	19	19	0	0,52
(64) mepo - stp - sme - su	0	8	8	0	0,22
(65) mexc - nrm - tme - sa	0	7	7	0	0,19
(66) teoc - nrm - tte - hh	0	3	3	0	0,08
(67) mepc - nrm - tme - se	0	3	3	0	0,08
(68) teoc - sbm - mte - su	0	2	2	0	0,05
(69) teho - sbm - ite - hu	0	1	1	0	0,03
(70) mexo - nrm - sme - sa	0	1	1	0	0,03

(71) mexc - nrm - ime - sa	0	1	1	0	0,03
(72) mepo - nrm - tme - hu	0	1	1	0	0,03
(73) mepo - nrm - ome - hu	0	1	1	0	0,03
(74) medo - nrm - mme - ar	0	1	1	0	0,03
(75) medc - nrm - mme - ar	0	1	1	0	0,03

Tabla 1: Isobioclimas identificadas en el período de estudio. En azul se indican las isobioclimas que mayor aumento han experimentado en cuanto al número de estaciones ocupadas, y en rojo las que mayor disminución han sufrido. Datos ordenados de mayor a menor en términos de porcentaje de estaciones ocupadas durante el primer período de estudio. Fuente: Elaboración propia.

A lo largo del estudio, 35 isobioclimas aumentan su número de estaciones ocupadas, 37 lo pierden, y 3 no experimentan cambios. Entre ambos periodos, 9 isobioclimas que se encontraban presentes en el período 1953-1987 han desaparecido; así mismo, han aparecido 14 isobioclimas nuevas durante el período 1988-2022. Cabe destacar, sin embargo, que su respectiva representación es mínima (ver tabla 1). En la figura 1 puede observarse la evolución de las isobioclimas que mayor cambio (positivo / negativo) han experimentado a lo largo del período de estudio.

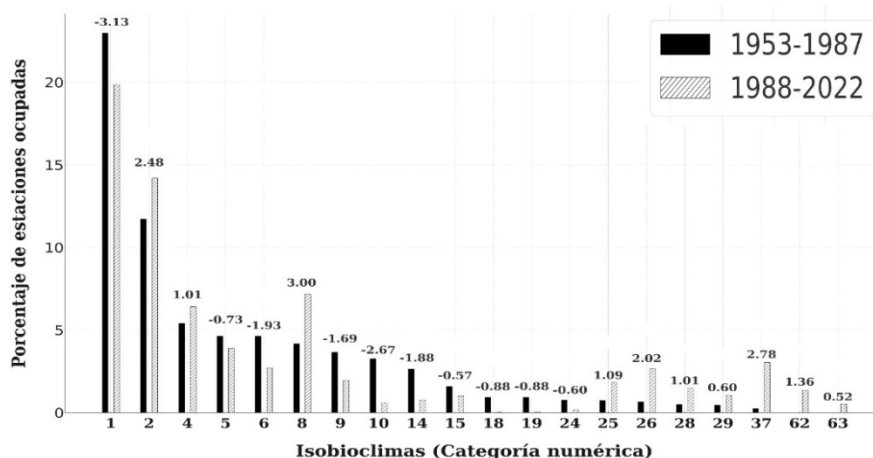


Fig. 1: Evolución de las isobioclimas que han experimentado un mayor cambio durante el periodo 1953-2022. Se observa su respectivo porcentaje de cambio total. Datos ordenados de mayor a menor en términos de porcentaje de estaciones ocupadas durante el primer período de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Las isobioclimas que mayor pérdida han experimentado en cuanto a su respectivo número de estaciones son “mepo - nrm - mme - se”, “teho - sbm - tte - hu” y “mepo - nrm - mme - se”; mientras que las que mayor ganancia han experimentado son “mexo - nrm - tme - sa”, “mepc - nrm - mme - se” y “mepo - nrm - tme - se”. Se han producido 246 tipos de transiciones isobioclimáticas (cambio de una isobioclima a otra diferente durante el segundo período). Como resultado, 1921 estaciones (un 52,37% del total) presentan una isobioclima diferente respecto a su respectiva isobioclima inicial. La

localización espacial de estas estaciones se observa en la figura 2. La distribución espacial de las estaciones que han experimentado cambios durante el período de estudio muestra un patrón espacial heterogéneo, pero con tendencias identificables.



Fig. 2: Distribución espacial de las estaciones que han mostrado cambios en su isobioclima inicial a lo largo del período de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Transición		Nº de estaciones en las cuales se ha producido esta transición	Porcentaje respecto del total de estaciones que han cambiado	Porcentaje respecto del total de estaciones del área de estudio
Isobioclima Período 1953-1987	Isobioclima Período 1988-2022			
mepo - nrm - mme - se	mepo - nrm - tme - se	121	6,30	3,30
mepo - nrm - tme - se	mexo - nrm - tme - sa	98	5,10	2,67
mepo - nrm - mme - se	mepc - nrm - mme - se	87	4,53	2,37
mepo - nrm - mme - su	mepo - nrm - mme - se	74	3,85	2,02
mepo - nrm - sme - se	mepo - nrm - mme - se	51	2,65	1,39
mepo - nrm - mme - se	mexo - nrm - mme - sa	45	2,34	1,23
mexo - nrm - mme - sa	mepo - nrm - mme - se	45	2,34	1,23
mepo - nrm - mme - se	mepo - nrm - mme - su	42	2,19	1,15
mepo - nrm - tme - su	mepo - nrm - tme - se	41	2,13	1,12
teho - sbm - tte - hu	teoc - sbm - tte - hu	41	2,13	1,12
teoc - sbm - ste - su	teoc - sbm - mte - su	35	1,82	0,95
mepo - nrm - mme - se	mepo - stp - mme - se	32	1,67	0,87
teoc - sbm - mte - hu	teoc - sbm - mte - su	31	1,61	0,85
mepo - nrm - mme - se	mexo - nrm - tme - sa	30	1,56	0,82
texe - sbm - mte - se	mepo - nrm - mme - se	29	1,51	0,79
teoc - sbm - ste - hu	teoc - sbm - mte - hu	28	1,46	0,76
teho - sbm - tte - hu	teoc - sbm - tte - su	27	1,41	0,74
teoc - sbm - mte - su	mepo - nrm - mme - su	26	1,35	0,71
mepo - nrm - sme - se	mepo - nrm - sme - su	25	1,30	0,68
teho - sbm - tte - hu	teho - sbm - tte - su	25	1,30	0,68
teoc - sbm - ste - su	mepo - nrm - sme - su	25	1,30	0,68
teoc - sbm - mte - su	texe - sbm - mte - se	22	1,15	0,60
mepo - nrm - mme - se	mexc - nrm - mme - sa	21	1,09	0,57
mepo - nrm - sme - su	mepo - nrm - sme - se	20	1,04	0,55
Total		1021	53,13	27,85

Tabla 2: Transiciones de isobioclimas más comunes producidas a lo largo del período de estudio. Fuente: Elaboración propia

Se observa una concentración de cambios en la franja norte peninsular (especialmente en la cornisa cantábrica y los Pirineos), el litoral mediterráneo (particularmente en la región catalana) y en las Islas Baleares. También se aprecia una notable densidad de cambios en los sistemas montañosos del interior peninsular, especialmente en el Sistema Ibérico. Por el contrario, las zonas centrales de ambas mesetas, así como áreas de Extremadura y Andalucía occidental muestran una menor densidad de cambios, sugiriendo una mayor estabilidad bioclimática.

Cabe destacar que la mayoría de las transiciones producidas son minoritarias. De hecho, el conjunto de las 25 transiciones más comunes (aquellas cuyo porcentaje de cambio respecto del total de estaciones que han cambiado es superior al 1%) engloba más de la mitad de las estaciones que han experimentado cambios en su respectiva isobioclima inicial. En concreto, estas 25 transiciones engloban 1.021 estaciones, es decir, un 53,13% del total de estaciones que han experimentado cambios.

Estas 25 transiciones isobioclimáticas pueden observarse en la tabla 2. Así mismo, en la figura 3 se detallan sus respectivas localizaciones espaciales.

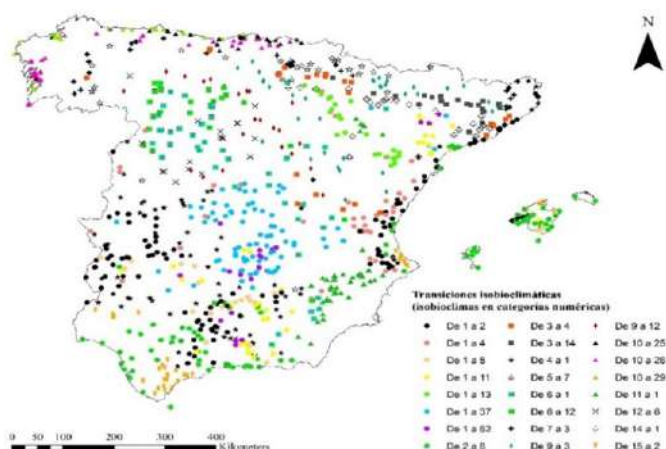


Fig. 3: Distribución espacial de las transiciones isobioclimáticas más comunes a lo largo del periodo de estudio. Fuente: Elaboración propia.

4. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos revelan cambios en la distribución espacio - temporal de las isobioclimas en la Península Ibérica y las Islas Baleares durante el periodo 1953-2022, evidenciando una tendencia la cual también fue observada por López-Fernández *et al.* en su estudio de 2016. Destaca el incremento observado en la predominancia del macrobioclima Mediterráneo, que ha pasado de ocupar el 62,43% de las estaciones al 69,36%. Dicha expansión se ha producido a expensas del macrobioclima Templado, evidenciando un proceso de "mediterraneización", en coherencia con las tendencias de cambio climático observadas en el área de estudio (Páscoa *et al.*, 2021; Sandonis *et al.*, 2021). Este cambio se complementa, así mismo, con una tendencia hacia la homogeneización bioclimática de las regiones templadas, manifestada no solo en la

pérdida neta de diversidad isobioclimática dentro del macrobioclima Templado, sino también en la simplificación de los gradientes bioclimáticos, destacando la reducción de los bioclimas “teho” y “texe” en favor del bioclima “teoc”, siendo particularmente notoria la disminución de las isobioclimas "teho-sbm-tte-hu" y "texe-sbm-mte-se".

A lo largo del período de estudio, las isobioclimas "mepo - nrm - mme - se" y "mepo - nrm - tme - se" se mantienen como las dominantes. No obstante, presentan dinámicas opuestas: negativa en la primera, y positiva en la segunda. Esta tendencia sugiere un desplazamiento hacia condiciones más cálidas y una posible aridificación dentro del área ocupada por el macrobioclima Mediterráneo, concordando con las proyecciones de aridificación estimadas para Península Ibérica en el contexto del cambio climático (Claro *et al.*, 2023). Así mismo, el aumento de isobioclimas como "mexo - nrm - tme - sa" y "mepc - nrm - mme - se" indica una tendencia hacia condiciones más continentales y extremas en el macrobioclima Mediterráneo.

Por otro lado, las transiciones isobioclimáticas producidas, observadas en el 52,37% de las estaciones, reflejan una elevada dinámica de cambio en la configuración bioclimática del territorio. La existencia de una gran variedad de tipos diferentes de transiciones (246 en total), así como su heterogeneidad espacial, indica que los cambios producidos no son uniformes. El análisis detallado de las transiciones isobioclimáticas revela un patrón de termificación y xerificación. La transición más frecuente, “mepo – nrm – mme - se” → “mepo – nrm – tme - se”, implica un incremento térmico; mientras que la segunda más común, “mepo – nrm – tme - se” → “mexo – nrm – tme - sa”, representa una intensificación de la aridez.

Por último, el incremento en el número total de isobioclimas identificadas durante el segundo período de estudio sugiere una diversificación bioclimática, posiblemente asociada a los efectos del cambio climático. La aparición de 14 nuevas isobioclimas, mayoritariamente correspondientes a combinaciones características de condiciones más cálidas y secas, y la desaparición de 9 existentes en el primer período de estudio refuerza la hipótesis de una reconfiguración bioclimática, en respuesta a las variaciones climáticas recientes. Este aumento se ha producido a través de un incremento del número de isobioclimas mediterráneas y una disminución de las isobioclimas templadas. Esto podría tener implicaciones para la conservación de la biodiversidad, ya que representa la manifestación de condiciones ambientales potencialmente nuevas para las especies y comunidades vegetales existentes. Por otro lado, las nuevas isobioclimas identificadas en el segundo período, aunque con representación mínima, podrían estar actuando como indicadores tempranos de cambios más profundos en el sistema bioclimático de la región. La identificación y monitoreo de estas isobioclimas emergentes podría permitir anticipar posibles impactos ecológicos, así como diseñar estrategias de gestión y conservación eficaces. En conclusión, los resultados apuntan hacia una reconfiguración bioclimática en la Península Ibérica y las Islas Baleares en las últimas décadas, presumiblemente vinculada al cambio climático. Estos cambios podrían tener implicaciones sobre los ecosistemas y la biodiversidad de la región, por lo que requieren una atención especial en futuros estudios y en la formulación de políticas ambientales.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se ha realizado en el marco de los proyectos de investigación PID2020-118797RB-I00 (MCIN/AEI/10.13039/501100011033), del Ministerio de Ciencia e Innovación, y PROMETEO/2021/016, de la Generalitat Valenciana.

REFERENCIAS

- Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). (2020). *Informe sobre el estado del clima de España 2020*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Recuperado de https://adaptecca.es/sites/default/files/documentos/informe_clima_2020_aemet-comprimido.pdf
- Claro, A. M., Fonseca, A., Fraga, H., & Santos, J. A. (2023). Susceptibility of Iberia to extreme precipitation and aridity: A new high-resolution analysis over an extended historical period. *Water*, 15(21), 3840. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/w15213840>
- Domonkos, P. (2014). The ACMANT2 software package. In *Eighth Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases and Third Conference on Spatial Interpolation Techniques in Climatology and Meteorology, WMO WCDMP-84* (pp. 46–72). World Meteorological Organization (WMO).
- Domonkos, P. (2015). Homogenization of precipitation time series with ACMANT. *Theoretical and Applied Climatology*, 122(1), 303–314. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-014-1298-5>
- López-Fernández, M. L., Peña-Angulo, D., Marco, R., López-Fernández, M. S., & González-Hidalgo, J. C. (2016). Variaciones entre Isobioclimas (1951–1980 y 1981–2010) en la España peninsular. In *X Congreso Internacional AEC: Clima, sociedad, riesgos y ordenación del territorio*. Universidad de Alicante. doi: <http://dx.doi.org/10.14198/XCongresoAECALicante2016-19>
- Miró, J. J., Caselles, V., & Estrela, M. J. (2017). Multiple imputation of rainfall missing data in the Iberian Mediterranean context. *Atmospheric Research*, 197, 313–330. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.07.016>
- Páscoa, P., Russo, A., Gouveia, C., Soares, P., Cardoso, R., Careto, J. A. M., & Ribeiro, A. F. S. (2021). A high-resolution view of the recent drought trends over the Iberian Peninsula. *Weather and Climate Extremes*, 32, 100320. doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.wace.2021.100320>
- Rivas-Martínez, S., Rivas Sáenz, S., & Penas, A. (2011). Worldwide bioclimatic classification system. *Global Geobotany*, 1(1), 1–634.
- Rivas-Martínez, S., Penas, Á., Díaz González, T. E., Canto, P., del Río, S., Costa, J. C., Herrero, L., & Molero, J. (2017). Biogeographic units of the Iberian Peninsula and Balearic Islands to district level. In J. Loidi (Ed.), *The vegetation of the Iberian Peninsula: Volume 2* (pp. 131–188). Springer. doi: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-54784-8_5
- Sandonis, L., González-Hidalgo, J. C., Peña-Angulo, D., & Beguería, S. (2021). Mean temperature evolution on the Spanish mainland 1916–2015. *Climate Research*, 82(1), 177–189. doi: <http://dx.doi.org/10.3354/cr01627>

THE ROLE OF FUSION ENERGY IN FUTURE ENERGY SCENARIOS

Carlos MANTILLA^{1,2}, Yolanda LECHÓN¹, Javier DUFOUR^{2,3}, Francesco GRACCEVA⁴ y Chiara BUSTREO⁵

¹*Energy System Analysis Unit. CIEMAT. Avda. Complutense 40, 28040 Madrid, Spain*

²*Rey Juan Carlos University, Chemical and Environmental Engineering Group, 28933, Móstoles, Spain*

³*IMDEA Energy, Systems Analysis Unit, 28935, Móstoles, Spain*

⁴*Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development (ENEA), Lungotevere Thaon di Revel 76, 00196 Rome, Italy*

⁵*Consorzio RFX (CNR, ENEA, INFN, University of Padua, Acciaierie Venete SpA), Corso Stati Uniti 4, 35127 Padova, Italy*

carlos.mantilla@ciemat.es

RESUMEN

El Consorcio Europeo para el Desarrollo de la Energía de Fusión (EUROfusion) apoya la investigación socioeconómica para evaluar la viabilidad y competitividad de la fusión nuclear dentro de un marco energético global bajo en carbono. Este estudio explora las posibles contribuciones de la fusión a los sistemas energéticos futuros utilizando el Sistema Integrado MARKAL-EFOM (TIMES) y el Modelo EUROfusion TIMES (ETM), que abarca 17 regiones globales y una base de datos rica en tecnología con más de mil tecnologías energéticas. Analizamos 25 escenarios, diferenciando la disponibilidad de la fusión (temprana o tardía), la tasa de difusión, las restricciones de energías renovables variables (vREN) y la sensibilidad a los costos de la fusión. Los resultados indican que la fusión podría alcanzar una participación significativa en la producción de electricidad, especialmente en condiciones de disponibilidad temprana y despliegue rápido, llegando hasta un 22% para el año 2100 en escenarios óptimos. En contraste, una difusión más lenta o una penetración no restringida de vREN reduce el papel de la fusión. Además, la adopción de la fusión permite una mayor electrificación, desplazando tecnologías fósiles de Captura y Almacenamiento de Carbono (CCS) y algunas renovables. La adopción regional varía, con una adopción temprana en regiones tecnológicamente avanzadas como China, India y Estados Unidos, mientras que otras regiones, incluyendo Europa, comienzan más tarde debido a factores económicos y técnicos. Los hallazgos enfatizan la importancia de la preparación tecnológica, la aceptación social y la disponibilidad de materiales, particularmente el tritio, en la determinación del potencial de la fusión.

Palabras clave: fusión nuclear, modelado de sistemas energéticos, sistemas energéticos bajos en carbono, impacto socioeconómico, integración de energías renovables, escenarios de políticas energéticas.

ABSTRACT

The European Consortium for the Development of Fusion Energy (EUROfusion) supports socio-economic research to assess the viability and competitiveness of nuclear fusion within a low-carbon global energy framework. This study explores fusion's potential contributions to future energy systems using The Integrated MARKAL-EFOM System (TIMES) and the EUROfusion TIMES Model (ETM), which incorporates 17 global regions and a technology-rich database of over one thousand energy technologies. We analyze 25 scenarios, differentiating fusion availability (early or late), diffusion rate, variable renewable energy (vREN) restrictions, and sensitivity to fusion costs. Results indicate that fusion could achieve significant electricity production shares, especially under conditions of early availability and rapid deployment, reaching up to 22% by 2100 in optimal scenarios. In contrast, slower diffusion or unrestricted vREN penetration reduces fusion's role. Additionally, fusion's adoption enables greater electrification, displacing fossil Carbon Capture and Storage technologies (CCS) and some renewables. Regional uptake varies, with early adoption in technologically advanced regions like China, India, and the USA, while other regions, including Europe, begin later due to economic and technical factors. Findings emphasize the importance of technological readiness, societal acceptance, and material availability, particularly tritium, in determining fusion's potential.

Key words: nuclear fusion, energy system modelling, low-carbon energy systems, socio-economic impact, renewable energy integration, energy policy scenarios.

1. INTRODUCTION

The European Consortium for the Development of Fusion Energy (EUROfusion) has promoted socio-economic studies on fusion to investigate the social acceptability and the economic competitiveness of fusion power plants in a future energy market.

Nuclear fusion will appear in the context of increasing energy demand due to the continuous population growth, decreasing renewable energy costs and the change in societies' energy-related behaviours together with an evident climate change. Fusion presents a good opportunity to produce a lot of energy while avoiding greenhouse gas (GHG) emissions.

The development of alternative energy system outlooks is the main tool to explore options for the future. A well-assessed model generator, The Integrated MARKAL-EFOM System (TIMES), is used to create the worldwide energy system model and look at its possible evolution according to different energy and environmental policies. Using this model, we analyse the contribution of fusion power to a future low-carbon global electricity system.

2. METODOLOGY

The TIMES model generator was developed as part of the IEA-ETSAP (Energy Technology Systems Analysis Program), an international community which uses

long-term energy scenarios to conduct in-depth energy and environmental analyses (Loulou et al., 2004).

The TIMES model generator combines two different, but complementary, systematic approaches to modelling energy: technical engineering approach and economic approach.

TIME's characteristics: technology-rich, bottom-up model generator, uses linear programming to produce a least-cost energy system, optimized according to several user constraints, typically for medium to long-term time horizons. Different scenarios can be built following different storylines, modifying uncertainties or driving forces like social dynamics toward transformation, innovation, geopolitical instability, policies or economic factors.

The EUROfusion TIMES Model (ETM) has a global resolution distributed in 17 regions. ETM is a technology-rich model consisting of a large techno-economic database with more than one thousand energy technologies for all the demand (residential, commercial, transport, industry and agriculture) and supply (power and heat generation and upstream) sectors. In ETM fusion technology is considered as an energy source alternative for future energy systems.

Two alternative fusion plants are considered based on the work done in EUROfusion (PPCS and DEMO): basic power plant and advanced power plant. The costs currently used in ETM are desired targets rather than estimates

Data for the fusion technologies.

	Date	Specific capital (\$ ₂₀₀₅ /kW)	Efficiency (%)	FIXOM (M\$ ₂₀₀₅ /GWh)	VAROM (M\$ ₂₀₀₅ /PJ)
Basic plant	2050	5910	42	65.8	2.16
	2060	4425	42	65.8	1.64
Advanced plant	2070	4220	60	65.3	2.14
	2080	3255	60	65.3	1.64

Table 1: Nuclear fusion costs. Source: Cabal et al., 2017.

The root scenario is aligned with the The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Shared Socioeconomic Pathways (SSP2), a “middle of the road” climate change scenario. We have selected the 2.6 RCP. Then, we distinguish alternatives for:

- Fusion availability horizon (Early 2035 and Late 2070)
- Fusion deployment rate (Fast and Slow) based on Tritium availability for start-up
- Technical restriction on variable renewable electricity deployment (restriction on vREN penetration and No restriction)
- Sensitivity on fusion costs (Low (*0.6), Reference and High (*1.2))

Creating 25 different scenarios including a scenario without fusion presence (S25)

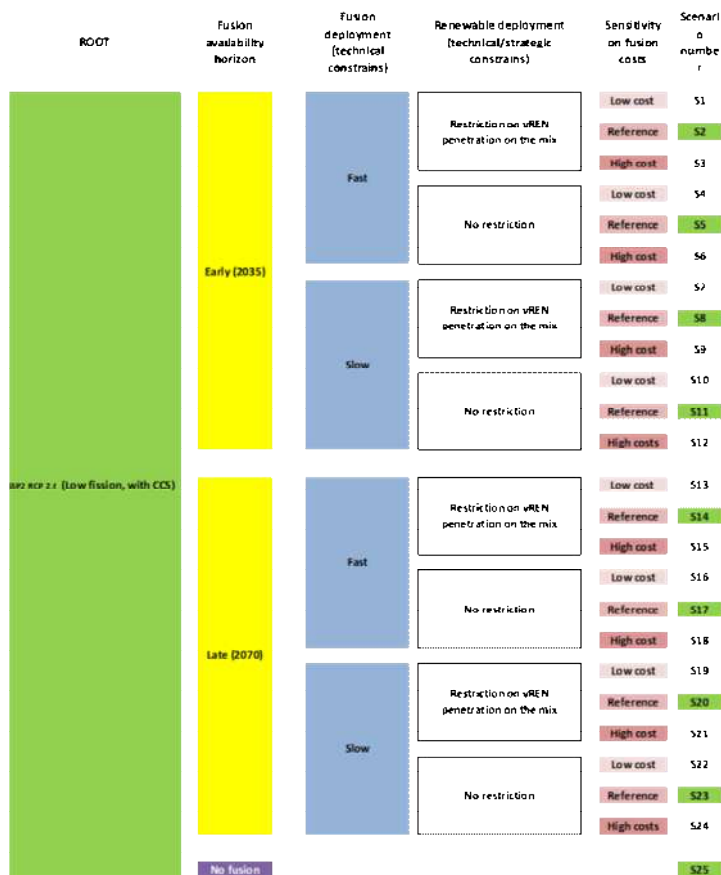


Fig. 1: Scenario tree. Source: Author

3. RESULTS

In all scenarios, the system evolves towards one dominated by renewables, especially solar PV and to a lesser extent wind, and nuclear technologies, including fission and fusion.

The maximum fusion penetration occurs in scenario S02 (early availability and fast diffusion of the fusion technology with restriction on vRES penetration) where it represents 22% of total electricity production in 2100. The minimum deployment of the technology occurs in scenario S23 (late availability and slow diffusion of the fusion technology with no restriction on vRES penetration).

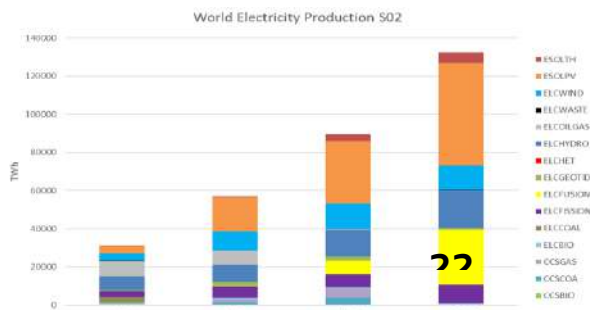


Fig. 2: World Electricity Production scenario S02. Source: Author



Fig. 3: Role of sensitivity parameters in fusion electricity production in 2100. Source: Author

In all scenarios, fusion enters the system shortly after it becomes commercially available, but its role is very sensitive to the factors analysed, in particular the speed of diffusion (fast or slow) and the time when it is expected to be available (early or late).

Technical constraints on the share of variable renewables (solar PV and wind) seem to play a role only in the scenarios with fast diffusion of fusion technology.

On the contrary, the investment cost of the fusion reactor is not a relevant factor for the expected share of the technology at the end of the century. Only a very strong increase in capital costs (*1.75) will reduce the penetration of fusion by 9%.

The availability of fusion allows for higher electricity production and thus higher electrification of the energy system. The technologies that are somehow displaced by fusion penetration, according to these results, are first fossil CCS technologies and then some renewables such as wind, solar PV and other renewables.

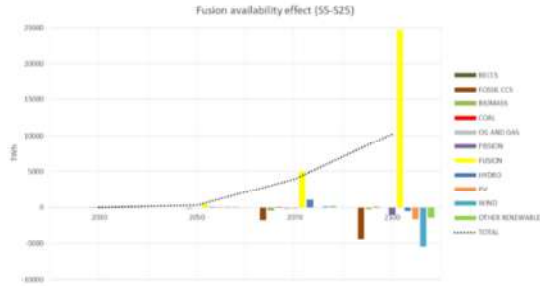


Fig. 4: Role of sensitivity parameters in fusion electricity production in 2100.
Source: Author

Some regions will start using fusion technology as soon as it becomes available. This is the case for China, India and the USA. Other regions start using fusion in 2070, such as Africa, Australia, the Middle East, Mexico, South Korea and other countries in Asia.

Europe starts to use fusion in 2080, waiting for the advanced technology to become available. In S2 and S5 the penetration of fusion is quite significant, reaching 42% and 46% respectively.

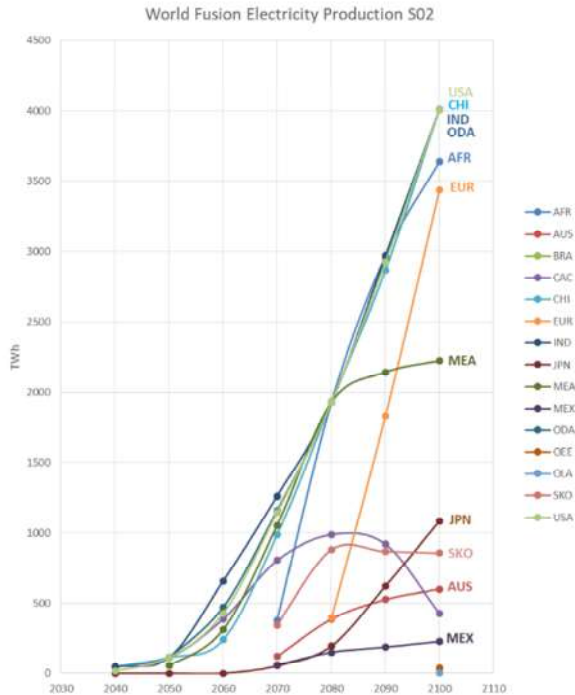


Fig. 5: Fusion electricity production in the different regions in scenario.

4. DISCUSSION

This study offers a detailed exploration of nuclear fusion's potential role in a future low-carbon global energy system, assessing its competitiveness and societal acceptance through various scenarios. By utilizing the TIMES model and the ETM database, which incorporates numerous socio-economic and technical variables, the analysis demonstrates the complex, dynamic interactions between fusion power, renewable energy sources, and fossil-based technologies under different policy, technological, and economic assumptions. Several critical insights emerge from the findings, which are essential for both policymakers and energy researchers.

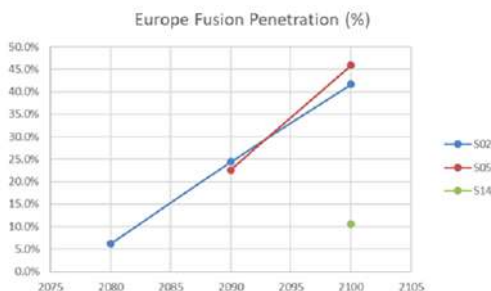


Fig. 6: Fusion electricity penetration in Europe. Source: Author

One key takeaway is that fusion technology, though potentially transformative, faces substantial variability in its projected role depending on availability timelines and deployment rates. Scenarios with early availability and fast diffusion of fusion indicate the highest penetration, reaching up to 22% of total electricity production by 2100 in the most favourable conditions. This outcome highlights fusion's capacity to complement renewable energy sources and achieve high levels of system decarbonisation, especially when certain restrictions limit variable renewable energy (vREN) contributions. In scenarios where these restrictions are absent, however, renewables such as solar PV and wind become dominant, pushing fusion to a more supplementary role.

The analysis also reveals that fusion technology can support higher electrification levels by displacing fossil-based carbon capture and storage (CCS) technologies, indicating that fusion could reduce dependency on carbon-intensive resources in favor of cleaner electricity. This impact on fossil CCS is a pivotal finding, as it suggests fusion's potential to accelerate fossil fuel phase-out within a diverse energy portfolio, even as it balances against intermittent renewables.

Investment costs in fusion appear to have minimal impact on its penetration except under scenarios with significantly increased capital costs. This suggests that financial barriers alone may not be decisive, but rather the technical readiness, societal

acceptance, and availability of crucial materials like tritium play more crucial roles in its uptake. For instance, the diffusion rate of fusion technology is closely tied to tritium availability, underscoring the need for ongoing research and resource planning to support fusion scalability.

The geographical differentiation in fusion adoption timing provides an important perspective on global energy equity. While fusion deployment begins in technologically advanced and resource-rich regions like China, India, and the USA in the early stages, less-developed regions such as Africa and the Middle East are projected to adopt fusion much later. This disparity could have far-reaching implications for global energy security and equitable access to low-carbon energy solutions.

Overall, this study underscores that fusion power, if integrated into the energy system effectively, could play a significant role in the future energy mix. However, realizing its potential will require a nuanced understanding of the timing, technological readiness, societal acceptance, and cross-regional equity in deployment. Addressing these factors thoughtfully can help shape energy policy and investment strategies that maximize fusion's role in achieving a sustainable and low-carbon future.

REFERENCES

- Cabal, H., Lechón, Y., Bustreo, C., Gracceva, F., Biberacher, M., Ward, D., & Grohnheit, P. E. (2017). Fusion power in a future low carbon global electricity system. *Energy Strategy Reviews*, 15, 1-8
- Loulou et al., 2005. Documentation for the TIMES Model - PART I 1–78.

ECOREGION BASED ATTRIBUTION ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF SEVERAL FIRE DANGER INDICES ON THE AMOUNT OF BURNED AREA AT A GLOBAL SCALE BY MEANS OF PSEUDO TRANSFER ENTROPY

Antonio PÉREZ¹, Riccardo SILINI², Iván SÁNCHEZ¹, Daniel SAN MARTÍN¹ y Joaquín BEDIA^{3,4}

¹*Predictia Intelligent Data Solutions S.L., Santander, Spain.*

²*Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, Spain.*

³*Universidad de Cantabria, Dpto. Matemática Aplicada y CC de la Computación, Santander, Spain.*

⁴*Grupo de Meteorología y Computación, Universidad de Cantabria, Unidad Asociada al CSIC, Santander, Spain*

aperez@predictia.es, riccardo.silini@upc.edu, sanchezi@predictia.es,
daniel@predictia.es, bediaj@unican.es

RESUMEN

Comprender las relaciones entre los incendios y el clima es esencial para evaluar los impactos que el clima futuro podría tener. No obstante, la complejidad de los factores que influyen en los incendios complica la atribución de la variabilidad observada. Para abordar este desafío, utilizamos –a diferencia de otros estudios– una medida de causalidad llamada "entropía de pseudo-transferencia" (pTE, por sus siglas en inglés). El estudio relaciona tres índices de riesgo de incendio ampliamente usados con las observaciones de área quemada a nivel global. El estudio se centra en las regiones definidas por el proyecto RESOLVE, que ofrecen una división espacial homogénea en relación a factores de combustible y clima. Además, se han analizado diferentes métodos de agregación espacial y temporal, empleando la media, el percentil 90, el percentil 95 y la suma.

Hemos desarrollado una herramienta interactiva que permite explorar y comparar los resultados obtenidos. Los hallazgos revelan tres conclusiones principales: 1) en general, los índices tienen un rendimiento similar para explicar las cantidades de área quemada, aunque las diferencias regionales pueden hacer que uno sea preferible sobre otro en estudios locales; 2) el método de agregación afecta los resultados de causalidad, siendo los percentiles más altos más relacionados por la pTE en comparación con la media; y 3) la herramienta interactiva es un recurso valioso para la comunidad científica, facilitando el análisis de los impactos del fuego y el avance en la comprensión de la relación entre incendios y clima.

Palabras clave: incendios globales, interacción fuego-clima, aplicación web interactiva, índices de riesgo de incendio, servicio climático.

ABSTRACT

Understanding the current fire-climate relationships is of utmost importance in order to assess the potential impacts that projected climate may exert in the near future. However, the many factors involved in fire activity often prevent a proper attribution of the observed variability. Unlike the many previous correlative studies, here we address this problem using a 'causality' measure known as “pseudo transfer entropy” (pTE), relating three widely used fire danger indices to the global observed burned areas. The study has been performed at an spatial aggregation level defined by the RESOLVE ecoregions, attending to their homogeneous fuel and climatic properties, and considering different spatial and temporal aggregation statistics (mean, 90th percentile, 95th percentile and sum).

We present an open, web-based interactive tool to explore and compare the results derived from the causality of these different fire danger indices with the observed burned area. Our results unveil some consistent patterns and three main conclusions can be drawn: 1) in the overall, all indices exhibit a similar performance in explaining observed burned areas, although regional differences may justify the selection of one index over another in regional studies, 2) the aggregation method used at the ecoregion level affects the causality results, with higher percentiles being better explained by pTE than the mean state and 3) the interactive tool designed may serve as a valuable method of intercomparison and analysis for the vulnerability and impact assessment community involved in fire research.

Key words: global wildfires, fire-climate interactions, interactive web application, fire danger index intercomparison, climate service.

1. INTRODUCTION

Fire is an integral earth system process whose causes are complex (Pausas, 2021), often difficult to disentangle, and largely dependent on the scale of analysis. Climate is one of the most important factors affecting fire regimes globally (Bedia, 2015; Abatzoglou, 2018; Gincheva, 2024). Understanding the current fire-climate relationships is of utmost importance in order to assess the potential impacts that projected climate may exert in the near future. However, the many factors involved in fire activity often prevent a proper attribution of the observed variability. Unlike the many previous correlative studies, here we address this problem using a 'causality' measure, in particular “pseudo transfer entropy” (pTE), relating three widely used fire danger indices (the Fire Weather Index from the Canadian Forest Service Fire Weather Index Rating System, the Fire Danger Index from the Australian McArthur Mark 5 Rating System and the Burning Index from the U.S. Forest Service National Fire-Danger Rating System) with global observed burned area records at a monthly scale in the last 20 years. Furthermore, we perform an intercomparison of these fire danger indices taking as spatial reference for the analysis the main terrestrial ecoregions.

2. METHODOLOGY

2.1. Data

To perform this study, three different datasets have been taken into consideration.

Fire danger indices

The Copernicus Climate Data Store (CDS) catalogue entry named “Fire danger indices historical data from the Copernicus Emergency Management Service” (ECMWF, 2019) offers historical –1979 to present– information for a set of indices related to fire danger. These indicators are retrieved in a regular latitude-longitude grid which covers the entire globe (180°W to 180°E, 90°S to 90°N) with a spatial resolution of 0.25° and a daily temporal resolution. From this CDS catalogue entry, data for 3 variables was downloaded: the Fire Weather Index (FWI) from the Canadian Forest Service Fire Weather Index Rating System, the Fire Danger Index (FDI) from the Australian McArthur Mark 5 Rating System and the Burning Index (BI) from the U.S. Forest Service National Fire-Danger Rating System.

Fire burned area from satellite observations

We have used monthly data of Burned Area (BA) at 0.25° resolution from the “Fire burned area from 2001 to present derived from satellite observations” database (C3S, 2019a; C3S, 2019b) which is publicly available through the Climate Data Store (<https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/satellite-fire-burned-area>) as part of the European Union’s Earth Observation Programme managed by the European Commission (<https://www.copernicus.eu/en>). The BA data used are derived through the analysis of reflectance changes from the medium resolution sensors Terra MODIS and Sentinel-3 OLCI, helped by the use of MODIS thermal information. The algorithms used are adapted to the native data from these sensors to produce an homogeneous gridded dataset of global coverage containing monthly data of BA at the grid scale, extending the database to the present.

RESOLVE Ecoregions dataset (2017)

RESOLVE Biodiversity and Wildlife Solutions provides access to this dataset containing information about 846 in-land ecoregions which depict an overall representation of our living planet (Dinerstein, 2017). There is an online visor showing the above mentioned ecoregions: <https://ecoregions.appspot.com/>

2.2. Extract, transform and load (ETL) pipeline

The process to clean and homogenise the raw data –described in section 2– can be divided in the following tasks (schematized in Figure 1):

Despite having the same spatial resolution (0.25°), the fire danger indices data needed to be regridded to the burned area observations grid due to the fact that their meshes presented some differences. Afterwards, the data is temporally aggregated to the same temporal resolution: 1 Month. Therefore, the fire danger indicators are converted from daily to monthly data and the burned area observations remain in a monthly resolution. As a last step, the ecoregion's metadata is used to perform a spatial aggregation on both the fire danger indices and the burned area observations.

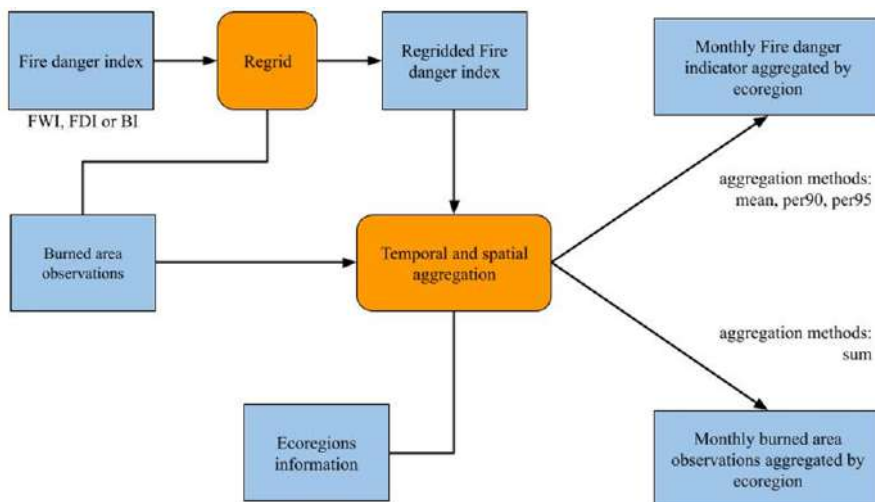


Figure. 1. Data processing scheme where the orange boxes represent tasks guided by an algorithm and blue boxes represent data that is used as input/output for the orange boxes.

The aggregation methods used remain constant in both temporal and spatial aggregation algorithms. As established in Table 1, the observed burned area was computed by the sum in order to have the total amount of area burned on time and space. However, the fire danger indices had a different approach and were computed using several statistical options such as the mean, the 90th percentile and the 95th percentile. Other aggregation methods such as the 99th percentile and the maximum were considered, but they presented a lower number of ecoregions with significant results on the causality measure.

	MEAN	PERCENTILE 90	PERCENTILE 95	SUM
FWI				
FDI				
BI				
BURNED AREA				

Table 1. Combination of variable - aggregation method which were taken into consideration (green).

As a consequence, there will be 10 different variables after the preprocessing task (+10 significance test results) for a total number of 693 ecoregions. This number is

lower than the total number defined by the RESOLVE dataset due to the following specific facts: 1) some ecoregions do not have enough extent to perform the temporal and spatial aggregation over them –no grid points inside them–, 2) only terrestrial information was provided by both the fire danger indices and the burned area observations, and 3) there are ecoregions with no presence of fire in their surface.

2.3. Causality analysis

Once the monthly data is computed, an analysis of the causality from fire danger indices to the fire burned area is performed using a recent fast and effective metric called pseudo transfer entropy (pTE) (Silini, 2021). Given two time series X and Y, we say that X causes Y, if the information contained in the past X, in conjunction with the information contained in the past of Y, can predict the future values of Y, better than the past of Y alone. This means that a fire danger index contains predictive skill on the observed burned area, if a significant pTE from the former to the latter is found. We compute the pTE between the monthly indices, using an embedding size of 2 and a time lag of 1. The embedding size is found by modelling the burned area time series as an autoregressive model.

Once the pTE between fire danger indices and burned area are computed, we have to account for their significance. From the original series we create 100 Iterative Amplitude Adjusted Fourier Transform (IAAFT) surrogates, preserving both the spectra and amplitude distributions, and we compute the pTE between them. The quantiles of the resulting pTE distribution, allow to define significance thresholds. In this study we consider a pTE value above the quantile 90 as significant.

3. RESULTS

In the context of the research project, a [web-app](#) has been designed as a framework to visualise the causality measurement by means of pTE of the different combinations between the set of fire danger indices and the chosen aggregation methods with the total burned area. The aggregation method –as well as the fire danger index– can be chosen on the right side panel. This tool allows the user to browse both the spatial and temporal characteristics of the different types of data. In this way, the user can study the spatial distribution of the causality of the different fire indices (Figure 2).

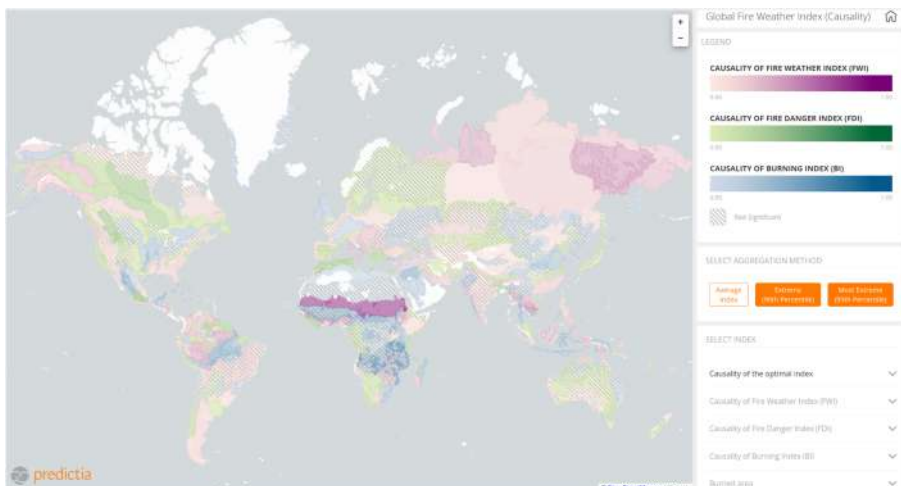


Figure 2. Home page of the web application designed to facilitate access to the processed data. At the left side, the ecoregion map with the 693 ecoregions available during the study. At the right side, there is a panel that acts as a selector to choose the different variables and aggregation methods available.

Moreover, the users can also carry out much more in-depth investigations at the ecoregion level (for instance, the Italian Sclerophyllous And Semi-Deciduous Forests), having access to other features such as static data (Figure 3) the analysis of aggregated time series (Figure 4), scatter plot relating the value of the index to the burned area (Figure 5), and a heatmap which compares the index-aggregation method combinations with the burned area on an annual basis (Figure 6).

REGION INFORMATION

FWI AVERAGE INDEX CAUSALITY: 0.21 (NOT SIGNIFICANT)

FDI AVERAGE INDEX CAUSALITY: 0.17 (NOT SIGNIFICANT)

BI AVERAGE INDEX CAUSALITY: 0.12 (NOT SIGNIFICANT)

FIRE SEASON: FROM JULY TO SEPTEMBER (2 MONTHS)

REGION AREA: 10,253,257HA

TOTAL BURNED AREA: 1,816,818HA (18% OF REGION AREA)

Figure 3. Example of ecoregion static information for the “Italian Sclerophyllous And Semi-Deciduous Forests” ecoregion. This static information contains: the causality of the different indices (FWI, FDI and BI) aggregated by a given aggregation method (95th percentile in this case), the fire season and its length, the ecoregion area and the corresponding total area burned.

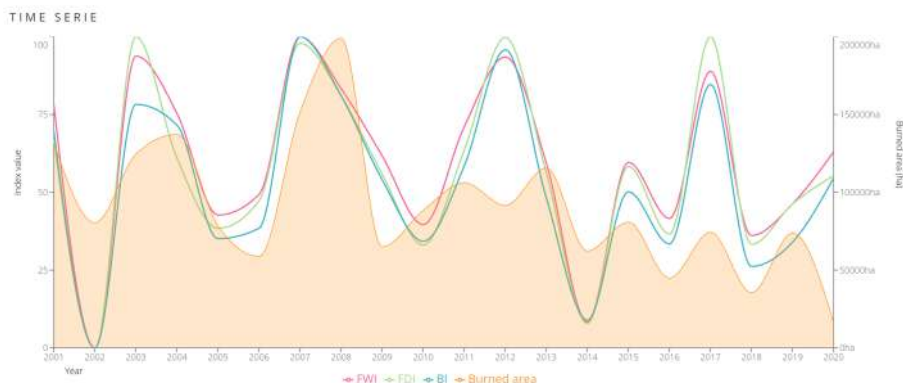


Figure 4. Example of time-serie showing the annual data for different indices (FWI, FDI and BI) aggregated by a given aggregation method (95th percentile in this case) and the total burned area for the “Italian Sclerophyllous And Semi-Deciduous Forests” ecoregion.

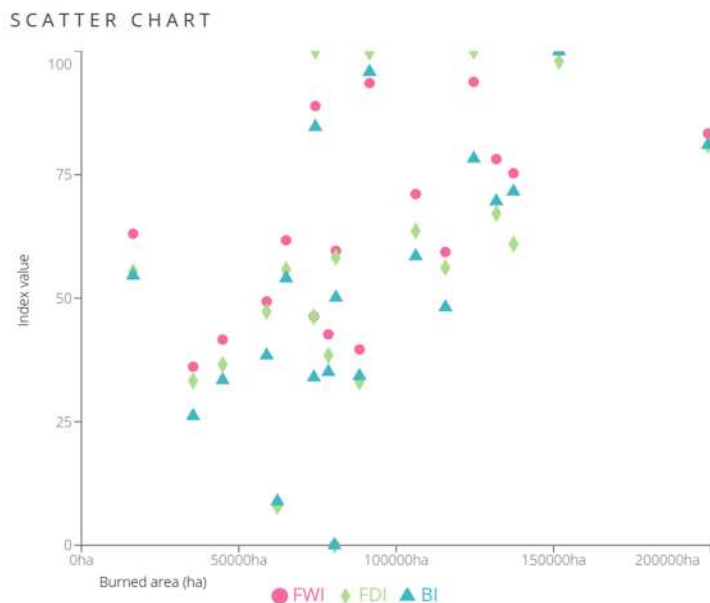


Figure 5. Example of scatter chart showing the relation between the different indices (FWI, FDI and BI) aggregated by a given aggregation method (95th percentile in this case) and the total burned area for the “Italian Sclerophyllous and Semi-Deciduous Forests” ecoregion.

HEATMAP FOR INDEXES, PERCENTILES AND BURNED AREA

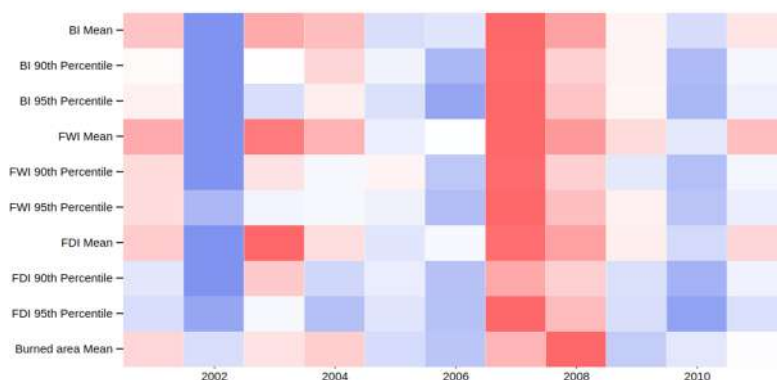


Figure. 6. Example of quantile based stripes showing the annual characterisation in comparison with the entire period for all the different combinations of indices (FWI, FDI and BI) and aggregation methods (mean, per90, per95) and the total burned area for the “Italian Sclerophyllous and Semi-Deciduous Forests” ecoregion. From blue to red, it indicates the quantile to which the data belongs: lower, mid-lower, mid-upper, upper.

4. DISCUSSION

Some important conclusions can be derived from the web application. Overall, there is not a fire danger index (FWI, FDI or BI) that works globally better since all of them exhibit a similar performance. However, it is more appropriate to use one specific index over others depending on the ecoregion of interest when conducting a local study. Moreover, all three indices follow similar patterns on how the significant ecoregions are distributed because most of them are located in three different main areas: over the boreal strip (Canada, Rusia, Greenland, among others), East-Asia and the Oceanic region, and the centre of Africa –where most of the worldwide area burned is located–.

The use of various aggregation methods allows the analysis of causality depending on whether more intermediate values of fire danger indices or more characteristic values of the extremes of these variables have been taken for the ecoregions of interest. Although there are more ecoregions with significant results when considering the mean value of the fire danger metric (FWI: 298, FDI: 281 and BI: 260) rather than, for instance, the 95th percentile (FWI: 269, FDI: 225 and BI: 240), it seems –as shown in the web-app– that the larger ecoregions are more affected by the extremes than ecoregions with a lower surface area.

REFERENCES

- Abatzoglou, J. T., Williams, A. P., Boschetti, L., Zubkova, M., & Kolden, C. A. (2018). Global patterns of interannual climate–fire relationships. Wiley. <https://doi.org/10.1111/gcb.14405>
- Bedia, J., Herrera, S., Gutiérrez, J. M., Benali, A., Brands, S., Mota, B., & Moreno, J. M. (2015). Global patterns in the sensitivity of burned area to fire-weather: Implications for climate change. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.09.002>
- Copernicus Climate Change Service (C3S) (2019): Fire burned area from 2001 to present derived from satellite observations, OLCI (Ocean and Land Colour Instrument), 5.1.1, Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). (Accessed on 9-Nov-2021), <https://doi.org/10.24381/cds.f333cf85>.
- Copernicus Climate Change Service (C3S) (2019): Fire burned area from 2001 to present derived from satellite observations, MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), 1.1, Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). (Accessed on 9-Nov-2021), <https://doi.org/10.24381/cds.f333cf85>.
- Dinerstein, E., Olson, D., Joshi, A., Vynne, C., Burgess, N. D., Wikramanayake, E., ... Saleem, M. (2017). *An Ecoregion-Based Approach to Protecting Half the Terrestrial Realm*. Oxford University Press (OUP). <https://doi.org/10.1093/biosci/bix014>
- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), (2021): Fire danger indices historical data from the Copernicus Emergency Management Service. v4.0. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). (accessed on 9-Nov-2021), <https://doi.org/10.24381/cds.0e89c522>.
- Gincheva, A., Pausas, J. G., Torres-Vázquez, M. Á., Bedia, J., Vicente-Serrano, S. M., Abatzoglou, J. T., ... Turco, M. (2024). The Interannual Variability of Global Burned Area Is Mostly Explained by Climatic Drivers. American Geophysical Union (AGU). <https://doi.org/10.1029/2023ef004334>
- Pausas, J. G., & Keeley, J. E. (2021). *Wildfires and global change*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/fee.2359>
- Silini, R., & Masoller, C. (2021). Fast and effective pseudo transfer entropy for bivariate data-driven causal inference. Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87818-3>

**EFFECTO A CORTO PLAZO DE MATERIAL PARTICULADO
PROCEDENTE DE LA COMBUSTIÓN DE BIOMASA Y ADVECCIÓN DE
POLVO DEL SAHARA SOBRE LOS INGRESOS HOSPITALARIOS
URGENTES POR TRASTORNOS MENTALES Y DEL
COMPORTAMIENTO, ANSIEDAD Y DEPRESIÓN EN ESPAÑA**

Raquel RUIZ-PÁEZ¹, José Antonio LÓPEZ-BUENO², Alicia PADRÓN-
MÓNEDERO³, Miguel Ángel NAVAS-MARTIN², Pedro SALVADOR
MARTINEZ⁴, Cristina LINARES GIL² y Julio DÍAZ JIMÉNEZ²

¹Universidad de Alcalá (UAH).

²Unidad de Referencia en Cambio Climático, Salud y Medio Ambiente Urbano.
Instituto de Salud Carlos III (ISCIII).

³Escuela Nacional de Sanidad (ENS). Instituto de Salud Carlos III (ISCIII).

⁴Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
(CIEMAT.)

raquelruizpaez@gmail.com, jalopez@isciii.es, a.padronm@isciii.es,
manavas@isciii.es, pedro.salvador@ciemat.es, clinares@isciii.es

RESUMEN

Métodos: Se identificaron 3 situaciones en 9 regiones de España durante 2009-2018: episodios de advección de polvo sahariano, combustión de biomasa, y la ausencia de ambos. Variables dependientes: ingresos hospitalarios diarios urgentes producidos por enfermedades mentales y del comportamiento, depresión y ansiedad. Variables Independientes: PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂, O₃ y temperatura de ola de calor (Tcal) expresada como exceso de grados de temperatura máxima diaria (Tmax) que supera los umbrales de salud pública. Con estas variables se ajustaron modelos lineales generalizados (GLM) de la familia Poisson controlados por estacionalidad, tendencia, componente autorregresiva y efectos a corto plazo. Posteriormente, fueron estimados Riesgos Relativos (RR) y Atribuibles (AR) para cada variable independiente; y, a partir de éstos, casos atribuibles a cada factor de riesgo.

Resultados: los días en los que hay combustión de biomasa las concentraciones de PMs tienen un importante impacto en los ingresos urgentes por enfermedades mentales, probablemente relacionado con la toxicidad de estas partículas. Sin embargo, en los días con advección de polvo sahariano, en vez del PM, son el resto de variables consideradas en el análisis las más dominantes con este tipo de ingresos. Conclusiones: Es necesario realizar planes de prevención en salud pública que tengan en cuenta el efecto conjunto de diversos factores de riesgo ambiental que actúen de forma sinérgica en determinadas situaciones.

Palabras clave: Combustión de biomasa, ola de calor, material particulado, ingresos hospitalarios urgentes, salud mental

ABSTRACT

Methods: Three states were identified in 9 provinces of Spain during the 2009-2018 period: sahara dust intrusion days, wildfire days, and days without any of them. **Dependent variable:** daily urgent admissions due to behavioral and mental conditions. **Independent variables:** PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂, O₃ and heat wave temperature (Tcal) defined as excess of maximum daily temperature (Tmax) over public health thresholds. Poisson Generalized Linear Models (GLM) were fitted, controlled for seasonality, trend, auto-regressive term and short-term effects. Then, Relative (RR) and Attributable Risks (AR) were estimated for each independent variable and, based on these, the cases attributable to each risk factor.

Results: PMs are associated with significant ($p < 0.05$) effects on mental health admissions in the wildfire days, probably due to the specific toxicity of this type of pollution. However, the other independent variables are the most relevant for mental health admissions on Sahara dust intrusion days.

Conclusion: The results evidence the need for prevention plans in public health that include the combined effect of the several environmental risk factors with synergic effects.

Keywords: Wildfire, heat wave, particulate matter, urgent admissions, mental health

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático está alterando la meteorología global, incrementando la concentración de ciertos contaminantes atmosféricos o su toxicidad (De Sario et al., 2013). Se ha observado, por ejemplo, que el Anticiclón de las Azores crece en amplitud, persistencia e intensidad, afectando a los procesos de dispersión de contaminantes en la atmósfera (Creswell-Clay et al., 2022). Esto ha llevado a un aumento en los niveles de inmisión en las regiones mediterráneas (Borge et al., 2018). Las emisiones de polvo desde regiones áridas, cuya extensión está aumentando en latitudes subtropicales de ambos hemisferios (Heffernan, 2016), también son muy sensibles a las condiciones meteorológicas y climáticas de las áreas de origen (Prospero, 2006). Así, el desierto del Sahara se ha expandido un 10 % entre 1920 y 2013 (Thomas y Nigam, 2018). Además, en los últimos 80 años se ha registrado un incremento en las condiciones atmosféricas a escala sinóptica que generan el transporte de masas de aire africanas hacia áreas de la Península Ibérica y las Islas Baleares aumentando los episodios de intrusión de polvo del Sáhara (Salvador et al., 2022). Las tendencias de probabilidad diaria de aparición de brotes de polvo africano, estadísticamente significativas, aumentaron un 0.018 %/año en la región noroeste de la Península Ibérica y un 0.054 %/año en su región sureste durante el periodo de 1940 a 2021 (Salvador et al., 2024).

Asimismo, el IPCC (2022) afirma que el cambio climático intensifica la frecuencia, intensidad y extensión de los incendios forestales. En 2022, en España se quemaron más de 300,000 hectáreas debido a incendios forestales (EFFIS, 2023). Numerosos estudios indican que tanto las PMs procedentes del Sahara (Díaz et al., 2017; Azzopardi et al., 2020) como las generadas por combustión de biomasa tiene un claro impacto en la salud (Linares et al., 2018; Kotsyfakis et al., 2019). Actualmente, la

evidencia se centra en su efecto sobre causas circulatorias y respiratorias (Reyes et al., 2014; Pérez et al., 2012). Pocos trabajos las relacionan con otros tipos de enfermedades (Tobías et al., 2011) o con parto prematuro y bajo peso al nacer (Moreira et al., 2020). Además, en muy pocas ocasiones se consideran las condiciones meteorológicas a escala sinóptica causantes de incendios forestales (Paschalidou y Kassomenos, 2016) y de advección de polvo (Russo et al., 2020), a pesar de que estas influyen en otros factores de riesgo (Ruiz-Páez et al., 2023).

Recientemente, se ha comenzado a investigar la incidencia de los incendios forestales en la aparición a largo plazo de trastornos de salud mental, como ansiedad y depresión (To et al., 2021; Gao, 2023; Escudero y Galway, 2022). Otras investigaciones, con un enfoque cuantitativo similar al del presente trabajo, se centran en el impacto específico de las PMs de los incendios forestales, hallando que un aumento de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en estas $\text{PM}_{2.5}$ se asocia con un incremento del 1.08 % (IC 95 %: 0.93 %, 1.23 %) en la mortalidad por trastornos mentales (Ma et al., 2023). Además, las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ procedentes de incendios influyen sobre los suicidios en áreas rurales y urbanas de América (Molitor et al., 2023).

Este estudio presenta la novedad de considerar la influencia las PMs con otras variables ambientales que se modifican y ocurren simultáneamente durante los incendios (en particular el O_3 , NO_2 , y las olas de calor) y que tienen impactos significativos sobre la morbilidad de la población (Díaz et al., 2017).

2. MÉTODOS

2.1. Identificación de días con aportes de polvo sahariano y humo de combustión de biomasa

Primero se identificaron eventos de polvo sahariano en 9 regiones de España (Periodo: 2009-2018) (Escudero et al., 2007), en base en la interpretación de salidas diarias de los modelos HYSPLIT, modelos numéricos (SKIRON - Universidad de Atenas; DREAM/BSCDREAM8b y MONARCH - Centro de Supercomputación de Barcelona; NAAPS - Laboratorio de Investigación Naval), imágenes de satélite (MODIS - NASA) y mapas sinópticos, todos ellos calculados u obtenidos de repositorios de acceso abierto (Escudero et al., 2007).

Simultáneamente, se identificaron los principales eventos de combustión que ocurrieron en cada una de las 9 regiones de estudio. La identificación se basó en la salida del NAAPS Global Aerosol Model (<https://www.nrlmry.navy.mil/aerosol/>). Giglio et al. (2003) detalla la inicialización y estimaciones del modelo. La validación de las estimaciones de PM se realizaron siguiendo las indicaciones de la Comisión Europea (Commission Staff Working Paper, 2011). Los episodios de combustión y advección de polvo del Sahara se recopilaron y son utilizados por el Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico de España (MITERD) (MITERD, 2023) para demostrar y corregir las superaciones de los estándares de calidad del aire atribuibles a fuentes naturales según la Directiva Europea 2008/50/CE (Commission Staff Working Paper, 2011). Estas bases de datos también han sido utilizadas para investigación (Díaz et al., 2017; Linares et al., 2018; Querol et al., 2019; Salvador et al., 2022; 2024).

Para cada una de las 9 regiones mencionadas, se ha seleccionado una provincia representativa (Moreira et al., 2020; Díaz et al., 2017). Para cada una de estas provincias se han clasificado los días en los que se produce aporte de material particulado por combustión de biomasa (combustión = 1) y los que no presentan este aporte (combustión = 0). De manera análoga, se han seleccionado los días con aporte de material particulado de origen africano (NAF = 1) y los que no tienen este aporte (NAF = 0).

		Desórdenes mentales y del comportamiento		Depresión		Ansiedad	
		N	lags	N	Lags	N	Lag
Sin combustión	PM	2	3/5	1	4	2	3/4
	NO2	4	0/4	2	0/4	2	0/1
	O3	6	3/8	3	3/8	2	0
	Theat	3	2/4	2	½	4	4/5
Con combustión	PM	6	0/3	2	0/5	2	3/4
	NO2	2	0	-	-	-	-
	O3	5	0/3	-	-	3	6/8
	Theat	3	2/4	-	-	1	5

Tabla1: Número de provincias en los que se establecen asociaciones entre las variables independientes con cada una de las causas de ingreso analizadas y retardos en los que se producen esas asociaciones en los días sin combustión y con combustión de biomasa.

2.2. Variable dependiente

La variable dependiente consiste en ingresos hospitalarios urgentes diarios provinciales entre el 01/01/2009-31/12/2018, por las siguientes causas: trastornos mentales y del comportamiento (CIE IX: 290-319 y E950-959; CIE X: F00-99 y X71-83); depresión (CIE IX: 296.2, 298.0, 625.4, 311 y CIE X: F32); y ansiedad (CIE IX: 300.0, 300.2, 300.3, 306.3 y CIE X: F40-F42). Fuente de los datos: Instituto Nacional de Estadística (INE), mediante acuerdo de confidencialidad de cesión de microdatos.

2.3. Variables independientes

Se han considerado las siguientes variables independientes: concentraciones medias diarias, medidas en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, de partículas de diámetro inferior a 10 micras (PM_{10}); concentraciones medias diarias de partículas de diámetro inferior a 2.5 micras ($\text{PM}_{2.5}$); dióxido de nitrógeno (NO_2); y ozono troposférico (O_3). Fuente de los datos: Red de Medida de la Contaminación Atmosférica del MITERD.

Además, se incluyó la temperatura máxima diaria en $^{\circ}\text{C}$ (T_{max}) del observatorio meteorológico representativo de cada provincia. Fuente de los datos: Agencia Estatal de Meteorología Española (AEMET).

2.4. Transformación de variables y otras variables de control

Las variables de contaminación atmosférica se utilizaron de forma lineal en base a estudios previos (Gómez González et al., 2023).

Por no poder ser asumible la relación lineal, la Tmax se parametrizó de la siguiente manera: $T_{cal} = 0$ si $T_{max} < T_{umbral}$ y $T_{cal} = T_{max} - T_{umbral}$ si $T_{max} \geq T_{umbral}$. La Tumbbral de cada provincia, que es la temperatura que define una ola de calor, es suministrada por el Ministerio de Sanidad (MINSAN, 2023). Además, se controló por estacionalidad anual, semestral, cuatrimestral y trimestral, tendencia, carácter autorregresivo de orden 1, así como vacaciones y festivos.

Dado que las variables independientes influyen sobre los ingresos hospitalarios en el corto plazo, se incluyeron variables retardadas hasta 5 días para PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂, Tcal; y de 8 días para el O₃ según lo indicado en la bibliografía (Gómez González et al., 2023).

2.5. Análisis estadístico

Primero se realizó una exploración descriptiva de las bases de datos. Posteriormente se ajustaron modelos lineales generalizados (GLM) de Poisson mediante backward stepwise regresión, hasta que únicamente quedaron variables estadísticamente significativas ($p < 0.005$). Se ajustaron modelos diferentes para los días que cumplen las condiciones combustión = 1, combustión = 0, NAF = 1 y NAF = 0.

A partir de los coeficientes de los modelos de Poisson (β) se calcularon los riesgos relativos (RR) y Atribuibles (RA). Los RA se calcularon para incrementos de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la concentración de contaminantes y de 1 °C para los valores de Tcal. A partir de los RA calculados, se determinaron los casos atribuibles expresados en porcentaje sobre la morbilidad total observada.

Se utilizando el software STATA/MP v18.0 y Microsoft Excel 2021.

3. RESULTADOS

Las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} fueron estadísticamente superiores los días con combustión y los días de advección de polvo sahariano en todas las provincias analizadas. El Ozono aumentó significativamente en 5/9 provincias los días de combustión y en 6/9 los días de intrusión. El NO₂ aumentó significativamente en 3/9 provincias durante los episodios de combustión, y en 2/9 (A Coruña y Las Palmas) durante los episodios de intrusión. La intensidad de las olas de calor tiende a ser superior los días de combustión (6/9 provincias) y de intrusión (9/9 provincias).

En relación con sus impactos en morbilidad, las PM pasan de tener efecto significativo sobre las enfermedades mentales y del comportamiento en 2 provincias los días sin combustión a 6 en los días con combustión. Además, estos efectos pasan de manifestarse entre los días 3 y 5 (sin combustión) a entre los días 0 y 3 (con combustión). En cambio, no se observa el mismo comportamiento para el polvo sahariano. El O₃ es un factor de riesgo relevante en ambas situaciones. Los Riesgos (Relativos y Atribuibles) generalmente fueron aproximadamente 3 veces mayores los días con combustión frente a los días sin combustión. Los riesgos también se intensificaron los días de advección de polvo sahariano, aunque con menor intensidad.

En relación con los ingresos por desórdenes mentales y del comportamiento, en Madrid, a los riesgos ambientales estudiados se les puede atribuir el 6% de los casos observados los días sin combustión, y un 17% los días con combustión. En ambos casos, los factores principales son los niveles de NO₂ y O₃. En Baleares, durante los días con combustión, se alcanza hasta un 29% de ingresos atribuibles a las PM y un 35% al O₃. Destaca Vizcaya, los días sin combustión el 9.3% de los ingresos se pueden atribuir a los factores de riesgo significativos (NO₂, PM); pero los días con combustión el 49% de los casos son atribuibles a la temperatura y el O₃. Para los ingresos por depresión, en Islas Baleares se encuentra que un 86% son atribuibles a las PM los días con combustión. Además, en A Coruña y Sevilla casi la totalidad de los casos se podrían atribuir a las temperaturas de ola de calor durante los episodios de combustión. En relación con la depresión, las provincias más castigadas son Islas Baleares, Sevilla y Vizcaya, durante los episodios de intrusión de polvo, por PMs.

NAF = 0		Desórdenes mentales y del comportamiento		Depresión		Ansiedad	
		N	Lags	N	Lags	N	Lag
	PM	3	1/5	1	0	1	0
	NO ₂	2	0	3	0/4	1	0
	O ₃	5	3/8	1	3	1	8
	Theat	3	2/4	3	1/5	3	4/5
NAF = 1	PM	2	4	-	-	1	1
	NO ₂	3	0/3	2	0	2	0
	O ₃	6	1/8	6	4/8	4	4/8
	Theat	2	2/3	4	0/3	1	5

Tabla2: Número de provincias en los que se establecen asociaciones entre las variables independientes con cada una de las causas de ingreso analizadas y retardos en los que se producen esas asociaciones en los días sin (NAF= 0) y con (NAF= 1) advección de material particulado procedente del Sáhara.

4. DISCUSIÓN

En ambas situaciones las concentraciones de PMs se incrementan de forma significativa. Lo cual concuerda con diversas publicaciones nacionales (Díaz et al., 2017; Russo et al., 2020) e internacionales (Uzunpinar et al., 2023). Sin embargo, las otras variables estudiadas también se modifican por las situaciones sinópticas propias de los episodios de intrusión de polvo sahariano (Russo et al., 2020) y combustión (Bencardino et al., 2011). Moreira et al. (2020) reportó incrementos de NO₂ y O₃ durante los episodios de intrusión de polvo sahariano, posiblemente explicadas por el estrechamiento de la capa de mezcla (Pandolfi et al., 2014; Salvador et al., 2019; Li et al., 2017). Asimismo, las situaciones meteorológicas asociadas con las intrusiones de polvo están correlacionadas con las olas de calor (Soussa et al., 2019; Ruiz-Páez et al., 2023). Las condiciones que favorecen los incendios forestales (altas temperaturas e insolación) también propician la formación de O₃ troposférico, lo que coincide con lo observado en otros estudios (Bencardino et al., 2011; Jaffe et al., 2013).

Específicamente durante los episodios de combustión se han identificado picos episódicos de ingresos hospitalarios atribuibles a las PM por desórdenes mentales y del comportamiento, además de mayores RR a más corto plazo. Esto concuerda con algunas investigaciones (Milton and White, 2020) que indican que las PM procedentes de la combustión son más tóxicas que las que normalmente existen a nivel ambiental, debido a sus altos niveles de benzo(a)pireno y compuestos orgánicos (Sánchez de la Campa et al., 2018). Junto con las PMs el O₃ es un factor de riesgo relevante durante los episodios de combustión, pero también durante los episodios de intrusión.

Durante los episodios de combustión e intrusión de polvo sahariano se observaron riesgos mayores que en los días con advección del polvo sahariano. Una posible explicación es el propio efecto sinérgico debido a altas temperaturas, PM, y ozono (Zhang et al., 2023, Ruiz-Páez et al., 2023).

Este estudio presenta las limitaciones inherentes a los estudios ecológicos. En primer lugar, sus resultados no se pueden extrapolar a nivel individual. Además, la exposición no se mide *in situ*. Adicionalmente, la heterogeneidad de las estaciones meteorológicas y de contaminación pueden acarrear sesgos. Sin embargo, se ha utilizado metodología habitual y validada en este tipo de estudios, y la inclusión de variables de control limitan el alcance de estos sesgos (Samet et al., 2000). Además, el estudio no está libre de problemas de desalineamiento (Gelfand, 2010; Barceló et al., 2016). Otra limitación es el bajo número de ingresos hospitalarios urgentes por ansiedad y depresión, así como por desórdenes mentales y del comportamiento. Esto también puede contribuir a la inflación de los riesgos relativos (RR) y los riesgos atribuibles (AR), así como ensanchar sus intervalos de confianza. En la misma línea, el número de días de combustión de biomasa o de intrusión de polvo del Sahara es muy reducido, lo que tiene un efecto similar sobre los RR y AR.

4.1. Conclusión

Los resultados son compatibles con una mayor toxicidad sobre el sistema nervioso de las PMs originadas por combustión que las asociadas con el polvo sahariano.

Durante los episodios de combustión y los de intrusión de polvo sahariano los niveles de O₃ y temperatura tienden a aumentar, debido a las situaciones sinópticas que favorecen estos episodios. En determinadas ocasiones, estos factores de riesgo conllevan más impacto en la morbilidad que las propias PMs.

Estos resultados enfatizan la necesidad de implementar estudios y planes de prevención en salud con un enfoque integrador.

REFERENCIAS

- Azzopardi, B., Balzan, M. V., Cherif, S., Doblas-Miranda, E., dos Santos, M., Dobrinski, P., & Xoplaki, E. (2020). Climate and environmental change in the Mediterranean basin—current situation and risks for the future. In *First Mediterranean Assessment Report*.
- Barceló, M. A., Varga, D., Tobias, A., Díaz, J., Linares, C., & Saez, M. (2016). Long term effects of traffic noise on mortality in the city of Barcelona, 2004–2007. *Environmental Research*, 147, 193–206.

- Bencardino, M., Sprovieri, F., Cofone, F., & Pirrone, N. (2011). Variability of atmospheric aerosol and ozone concentrations at marine, urban, and high-altitude monitoring stations in southern Italy during the 2007 summer Saharan dust outbreaks and wildfire episodes. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 61(9), 952-967.
- Borge, R., Artíñano, B., Yagüe, C., Gomez-Moreno, F. J., Saiz-Lopez, A., Sastre, M., et al. (2018). Application of a short-term air quality action plan in Madrid (Spain) under a high-pollution episode - Part I: Diagnostic and analysis from observations. *Science of the Total Environment*, 635, 1561-1573.
- Commission Staff Working Paper. (2011). Establishing guidelines for demonstration and subtraction of exceedances attributable to natural sources under the Directive 2008/50/EC on ambient air quality and cleaner air for Europe. Brussels, 15.02.2011. SEC (2011) 208 final. Retrieved from: https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/Directrices%20Comisi%C3%B3n-SEC%202008%20final-en_tcm30-186523.pdf.
- Cresswell-Clay, N., Ummenhofer, C. C., Thatcher, D. L., et al. (2022). Twentieth-century Azores High expansion unprecedented in the past 1,200 years. *Nature Geoscience*, 15, 548–553.
- De Sario, M., Katsouyanni, K., & Michelozzi, P. (2013). Climate change, extreme weather events, air pollution and respiratory health in Europe. *European Respiratory Journal*, 42(3), 826–843. <https://doi.org/10.1183/09031936.00074712>.
- Díaz, J., Linares, C., Carmona, R., Russo, A., Ortiz, C., Salvador, P., & Trigo, R. M. (2017). Saharan dust intrusions in Spain: Health impacts and associated synoptic conditions. *Environmental Research*, 156, 455-467.
- EFFIS. (2023). Sistema Europeo de Información sobre Incendios Forestales. Retrieved from <https://www.copernicus.eu/es/sistema-europeo-de-informacion-sobre-incendios-forestales>.
- Eisenman, D. P., & Galway, L. P. (2022). The mental health and well-being effects of wildfire smoke: A scoping review. *BMC Public Health*, 22(1), 2274.
- Escudero, M., Querol, X., Pey, J., Alastuey, A., Pérez, N., Ferreira, F., Cuevas, E., Rodríguez, S., Alonso, S. (2007). A methodology for the quantification of the net African dust load in air quality monitoring networks. *Atmospheric Environment*, 41, 5516-5524.
- European Commission. (2017). Special Eurobarometer 468 – September 2017. "Attitudes of European citizens towards the environment" (190 pages). doi:10.2779/84809. Retrieved from: <https://europa.eu/eurobarometer/surveys/detail/2156>.
- Gao, Y., Huang, W., Yu, P., Xu, R., Yang, Z., Gasevic, D., Ye, T., et al. (2023). Long-term impacts of non-occupational wildfire exposure on human health: A systematic review. *Environmental Pollution*, 1(320), 121041.
- Gelfand, A. E. (2010). Misaligned spatial data: The change of support problem. In A. E. Gelfand, P. J. Diggle, M. Fuentes, & P. Guttorp (Eds.), *Handbook of Spatial Statistics* (pp. 421-431). Taylor & Francis.
- Giglio, L., Descloitres, J., Justice, C. O., & Kaufman, Y. (2003). An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 87, 273–282.

- Gómez González, L., Linares, C., Díaz, J., Egea, A., Calle, A., Luna, M. Y., Navas, M. A., Ascaso-Sánchez, M. S., Ruiz-Páez, R., Asensio, C., Padrón-Monedero, A., & López-Bueno, J. A. (2023). Short-term impact of noise, other air pollutants and meteorological factors on emergency hospital mental health admissions in the Madrid Region. *Environmental Research*, 224, 115505.
- Heffernan, O. (2016). The mystery of the expanding tropics. *Nature*, 530, 20–22.
- IPCC. (2022). Sixth Assessment Report. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>.
- Jaffe, D. A., Wigder, N., Downey, N., Pfister, G., Boynard, A., & Reid, S. B. (2013). Impact of wildfires on ozone exceptional events in the western U.S. *Environmental Science & Technology*, 47(19), 11065–11072.
- Kotsyfakis, M., Zarogiannis, S. G., & Patelarou, E. (2019). The health impact of Saharan dust exposure. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, 32(6), 749-760.
- Li, Z., Guo, J., Ding, A., Liao, H., Liu, J., Sun, Y., Wang, T., Xue, H., Zhang, H., & Zhu, B. (2017). Aerosol and boundary-layer interactions and impact on air quality. *Nature Science Review*, 4(6), 810–833.
- Linares, C., Carmona, R., Salvador, P., & Díaz, J. (2018). Impact on mortality of biomass combustion from wildfires in Spain: A regional analysis. *Science of the Total Environment*, 622-623, 547–555.
- Ma, Y., Zang, E., Liu, Y., Lu, Y., Krumholz, B. M., et al. (2023). Wildfire smoke PM_{2.5} and mortality in the contiguous United States. medRxiv. <https://doi.org/10.1101/2023.01.31.23285059>
- Milton, L. A., & White, A. R. (2020). The potential impact of bushfire smoke on brain health. *Neurochemistry International*, 139, 104796. <https://doi.org/10.1016/j.neuint.2020.104796>
- MINSAN. (2023). Plan Nacional de Actuaciones Preventivas ante Altas Temperaturas. Retrieved from https://www.sanidad.gob.es/ciudadanos/saludAmbLaboral/planAltasTemp/2023/Plan_nacional_actuaciones_preventivas.htm
- MITERD. (2023). Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Retrieved from https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/evaluacion-datos/fuentes-naturales/prediccion_episodios_naturales.html
- Molitor, D., Mullins, J. T., & White, C. (2023). Air pollution and suicide in rural and urban America: Evidence from wildfire smoke. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 120(38), e2221621120.
- Moreira, I., Linares, C., Follos, F., Sánchez-Martínez, G., Vellón, J. M., & Díaz, J. (2020). Short-term effects of Saharan dust intrusions and biomass combustion on birth outcomes in Spain. *Science of the Total Environment*, 134755.
- Pandolfi, M., Tobias, A., Alastuey, A., Sunyer, J., Schwartz, J., Lorente, J., Pey, J., & Querol, X. (2014). Effect of atmospheric mixing layer depth variations on urban air quality and daily mortality during Saharan dust outbreaks. *Science of the Total Environment*, 494-495, 283–289.

- Paschalidou, A. K., & Kassomenos, P. A. (2016). What are the most fire-dangerous atmospheric circulations in the Eastern Mediterranean? Analysis of the synoptic wildfire climatology. *Science of the Total Environment*, 539, 536–545.
- Pérez, L., Tobías, A., Querol, X., Pey, J., Alastuey, A., Díaz, J., & Sunyer, J. (2012). Saharan dust, particulate matter and cause-specific mortality: A case-crossover study in Barcelona (Spain). *Environment International*, 48, 150–155.
- Prospero, J. M. (2006). Saharan dust impacts and climate change. *Oceanography*, 19, 60–61.
- Querol, X., Pérez, N., Reche, C., Ealo, M., Ripoll, A., Tur, J., Pandolfi, M., Pey, J., Salvador, P., Moreno, T., Alastuey, A. (2019). African dust and air quality over Spain: Is it only dust that matters? *Science of the Total Environment*, 686, 737–752. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.349>
- Reyes, M., Díaz, J., Tobías, A., Montero, J. C., & Linares, C. (2014). Impact of Saharan dust particles on hospital admissions in Madrid. *International Journal of Environmental Health Research*, 24, 63–72.
- Ruiz-Páez, R., Díaz, J., López-Bueno, J. A., Navas, M. A., Mirón, I. J., Martínez, G. S., Luna, M. Y., & Linares, C. (2023). Does the meteorological origin of heatwaves influence their impact on health? A 6-year morbidity and mortality study in Madrid (Spain). *Science of the Total Environment*, 855, 158900.
- Russo, A., Soussa, P. M., Durao, R. M., Ramos, A. M., Salvador, P., Linares, C., Díaz, J., & Trigo, R. M. (2020). Saharan dust intrusions in the Iberian Peninsula: Predominant synoptic conditions. *Science of the Total Environment*, 717, 137041.
- Salim, S. (2014). Oxidative stress and psychological disorders. *Current Neuropharmacology*, 12, 140–147.
- Salvador, P., Molero, F., Fernández, A. J., Tobías, A., Pandolfi, M., et al. (2019). Synergistic effect of the occurrence of African dust outbreaks on atmospheric pollutant levels in the Madrid metropolitan area. *Atmospheric Research*, 226, 208–218.
- Salvador, P., Pey, J., Pérez, N., et al. (2022). Increasing atmospheric dust transport towards the western Mediterranean over 1948–2020. *npj Climate and Atmospheric Science*, 5, 34. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-00393-9>
- Salvador, P., Pey, J., Pérez, N., Alastuey, A., Querol, X., & Artíñano, B. (2024). Estimating the probability of occurrence of African dust outbreaks over regions of the western Mediterranean basin from thermodynamic atmospheric parameters. *Science of the Total Environment*, 922, 171307. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171307>
- Samet, J., Dominici, F., Zeger, S., Schwartz, J., & Dockery, D. (2000). The National Morbidity, Mortality and Air Pollution Study. Part I: Methods and Methodologic Issues. Health Effects Institute.
- Sánchez de la Campa, A. M., Salvador, P., Fernández-Camacho, R., Artíñano, B., Coz, E., Márquez, G., Sánchez-Rodas, D., & de la Rosa, J. (2018). Characterization of biomass burning from olive grove areas: A major source of organic aerosol in PM10 of Southwest Europe. *Atmospheric Research*, 199, 1–13.
- Sousa, P. M., Barriopedro, D., Ramos, A. M., García-Herrera, R., Espirito-Santo, F., Trigo, R. M. (2019). Saharan air intrusions as a relevant mechanism for Iberian

heatwaves: The record breaking events of August 2018 and June 2019. *Weather and Climate Extremes*, 26, 100224.

To, P., Eboreime, E., & Agyapong, V. I. (2021). The impact of wildfires on mental health: A scoping review. *Behavioral Sciences (Basel)*, 11(9), 126. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34562964/>

Tobías, A., Caylá, J. A., Pey, J., Alastuey, A., & Querol, X. (2011). Are Saharan dust intrusions increasing the risk of meningococcal meningitis? *International Journal of Infectious Diseases*, 15, e503.

Thomas, T., & Nigam, S. (2018). Twentieth-century climate change over Africa: Seasonal hydroclimate trends and Sahara desert expansion. *Journal of Climate*, 31, 3349–3370.

Trang, P. M., Rocklöv, J., Giang, K. B., Kullgren, G., & Nilsson, M. (2016). Heatwaves and hospital admissions for mental disorders in Northern Vietnam. *PLoS One*, 11, e0155609.

Uzunpinar, E. S., Imamoglu, I., Rahmani, A., & Tuncel, G. (2023). Modification of Saharan dust size distribution during its transport over the Anatolian Plateau. *Science of the Total Environment*, 892, 164646.

Zhang, Y., Yin, Z., Li, S., Zhang, J. J., Sun, H. Z., Liu, K., Shirai, K., Hu, K., Qiu, C., Liu, X., Li, Y., Zeng, Y., & Yao, Y. (2023). Ambient PM_{2.5}, ozone, and mortality in Chinese older adults: A nationwide cohort analysis (2005-2018). *Journal of Hazardous Materials*, 454, 131539. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131539>

EVOLUCIÓN DE LA CLIMATOLOGÍA URBANA EN MÉXICO 1791-2024: ISLAS DE CALOR Y BALANCE DE ENERGÍA

Adalberto TEJEDA-MARTÍNEZ¹, Elda LUYANDO², Irving Rafael MÉNDEZ-PÉREZ³ y Raquel Elisa HERNÁNDEZ-PARRA¹

¹*Grupo de Climatología Aplicada de la Universidad Veracruzana (México)*

²*Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la Universidad Nacional Autónoma de México*

³*Centro de Ciencias de la Tierra de la Universidad Veracruzana (México)*

atejeda.martinez@gmail.com, ellu@atmosfera.unam.mx, irmendez@uv.mx,
raqueleliahernandezparra@gmail.com

RESUMEN

Los primeros esbozos de estudios de la isla de calor urbana (ICU) en México datan de 1791, pero el desarrollo sistemático de la climatología urbana en el país tiene siete décadas. La cuarta parte de las publicaciones de este periodo (alrededor de 350, sin considerar las de calidad del aire), se refieren a la ICU. En un 70 % estas publicaciones se ocupan de las islas dentro del dosel urbano o en la base de la capa límite superficial, y solo un 30% sobre la isla de calor superficial (la isla de calor subsuperficial o subterránea prácticamente no ha sido estudiada). Los primeros trabajos son comparaciones de termómetros urbanos contra rurales, o rurales que devinieron en urbanos por el crecimiento de las ciudades; después se empezaron a efectuar recorridos con vehículos instrumentados, los cuales siguen siendo utilizados. Las redes de estaciones meteorológicas han ido surgiendo por necesidades de prevención de desastres o acopladas a la medición de la calidad del aire, pero son la forma más común para el estudio de las islas de calor atmosféricas. Ya en este siglo, la accesibilidad a las imágenes térmicas generadas por sensores remotos ha producido un auge en el estudio de la isla de calor superficial. La evolución de estas técnicas, y la calidad de su uso, serán analizadas críticamente en esta comunicación.

Palabras clave: climatología urbana, México, métodos, isla urbana de calor.

ABSTRACT

The first outlines of studies of the urban heat island (UHI) in Mexico date back to 1790, but the systematic development of urban climate science in the country is seven decades old. A quarter of the publications from this period (around 350, without considering those on-air quality), refer to the urban heat island. 70% of these publications deal with islands within the urban canopy or at the base of the surface boundary layer, and only 30% on the surface heat island (the subsurface heat island has practically not been studied). Initially, the studies were comparisons between urban versus rural thermometers, or rural ones that became urban due to the growth of cities. Later, tours began with instrumented vehicles, which continue to be used.

Networks of meteorological stations have emerged due to disaster prevention needs or coupled with the measurement of air quality, but they are the most practical way to study atmospheric heat islands. Already in this century, the accessibility of thermal images generated by remote sensors has produced a boom in the study of the surface UHI. The evolution of these techniques, and the quality of their use, will be critically analyzed in this communication.

Keywords: urban climatology, Mexico, methods, urban heat island

1. INTRODUCCIÓN

La isla de calor urbana (ICU en adelante) es el fenómeno climático urbano más estudiado hasta la fecha, y también el más evidente. Las ciudades, a pesar de ser las principales contribuyentes al incremento de la temperatura en el planeta, ocupan menos del 3% de su superficie (Arshad et al., 2020). En México, de acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (<https://www.inegi.org.mx>), una localidad se considera urbana cuando tiene más de más de 2.500 personas. Con ese criterio, en México hay 185.243 localidades rurales contra 4.189 urbanas; estas últimas agrupan el 79% de la población nacional de cerca de 130 millones de habitantes.

El cambio de las condiciones térmicas de la atmósfera en las áreas urbanas es más acentuado que en las inmediaciones rurales, pues a escala local es la respuesta a la cubierta ahora artificial que absorbe radiación durante el día y la libera durante la noche a una razón menor respecto al campo. Este fenómeno es el origen de la ICU, pero hasta fechas recientes no hay registros de que, por sí sola, haya tenido efectos letales sobre la población en México (Luyando, 2016). Sin embargo, en periodos cálidos, las ICU generan una mayor demanda de energía por el aumento de aparatos de aire acondicionado e incremento en el número de horas en uso (Tejeda-Martínez, et al., 2022; Sisto et al., 2024); una mayor demanda de agua y también de servicios sanitarios para quienes no puedan costear la paliación de los efectos de las altas temperaturas (Vargas y Magaña, 2020).

Tanto el naturalista guatemalteco Antonio de Pineda, a finales del siglo XVIII en la ciudad de Celaya, México, como el químico londinense Luke Howard a principios del siglo XIX en Londres, concluyeron que la diferencia térmica entre el centro de las ciudades y a las afueras se debía al tipo de construcción y a los efectos por las actividades humanas (Méndez-Pérez, et al., 2023, Howard, 2006). Fue a inicios del siglo XX que Pepler (1929) a este fenómeno de contraste térmico le denominara, en alemán, *städtische Wärmerinsel* (*isla más caliente urbana*) y dos décadas después Balchin y Pye (1947) lo retoman en inglés como *urban heat island*. La Tabla 1 muestra los estudios pioneros en México sobre el tema: los primeros tres comparando termómetros fijos en áreas rurales y dentro del dosel urbano, y los dos más reciente mediante recorridos con vehículos.

Año del estudio	Ciudad	Autor y referencia	Método
1791	Celaya	Antonio de Pineda (Malaspina, 1885)	Comparación entre termómetros fijos
1895	Ciudad de México	Moreno y Anda, M. (1895)	Comparación entre termómetros fijos
1968	Ciudad de México	Riquelme (1968)	Comparación entre termómetros fijos
1967-68	Puebla	Gáb (1979)	Recorridos con vehículo
1968-69	Ciudad de México	Jáuregui (1971)	Recorridos con vehículo

Tabla 1: Publicaciones sobre la ICU en México anteriores a 1970.

Oke et al. (2017) clasifican a la ICU en cuatro tipos: subterránea, superficial, en el dosel o palio urbano, y en la capa límite (por encima del dosel urbano). Las que corresponden a la temperatura en la atmósfera son la del dosel y la de la capa límite, y son también las que han conformado la mayor parte de la bibliografía sobre clima urbano en México. Además de las breves visitas al tema de la atmósfera en ciudades mexicanas en los siglos XVIII y XIX, fue el investigador pionero Ernesto Jáuregui quien se dio a la tarea de identificar y caracterizar este fenómeno en ciudades como la de México, Toluca, Guadalajara o Mexicali. Si bien la primera publicación moderna acerca de la ICU en la Ciudad de México corresponde a Riquelme (1968), quien detectó diferencias urbano-rurales en cuatro sitios con usos de suelo diferentes, fue Jáuregui quien inició de forma metódica el estudio de la isla de calor atmosférica a principios de los 1970 (una revisión se encuentra en Tejeda-Martínez et al., 2024).

2. LOS ESTUDIOS DE LA ICU EN MÉXICO

Se revisaron más de cien publicaciones de la ICU en México (las disponibles en internet) que se pueden consultar en:

<https://drive.google.com/drive/folders/1mv4CaZc6LU13mtmvNiSy5B8V0oxuwHZx?usp=sharing>. Los niveles altitudinales de esos estudios se señalan en la Tabla 2.

Nivel	Prolegómenos (Antes 1970)	Inicio formal (1970-1980)	Arranque (1980-2000)	Consolidación (2001-2024)	Total
Superficie	0	0	0	23	23
Dosel	3	3	14	35	55
Capa límite (a veces combinada con el dosel)	1	0	2	4	7
Superficie/Dosel	0	0	1	17	18
Superficie/Capa límite	0	0	0	1	1

Tabla 2: Niveles de ICU estudiados en México.

Las publicaciones sobre la ICU en el dosel urbano dominan en los distintos periodos, pero en este siglo aparecen con frecuencia los trabajos sobre la ICU superficial, a veces combinada con el dosel o la capa límite. La razón es que cada vez es más accesible el uso de imágenes de satélite para detectar termografías de las superficies urbanas y su cubierta vegetal, como se ve en la Tabla 3, donde se mencionan y enumeran los métodos para cada periodo en que se ha dividido la bibliografía analizada (nótese que el conteo en las Tablas 2 a 5 no se corresponde con el total de textos estudiados, pues algunos trabajos pertenecen a varios ítems de cada Tabla).

Método	Prolegó- menos (antes de 1970)	Inicio formal (1970-1980)	Arranque (1981-2000)	Consolidación (2001-2024)	TOTAL
Comparación entre termómetros fijos (en pares o en redes)	3	2	12	33	50
Series de tiempo	0	1	8	21	30
Recorridos con vehículo instrumentado	1	2	4	15	22
Percepción remota	0	0	0	38	38
Modelación numérica/dinámica /meteorológica	0	0	1	10	11
Software arquitectónico o urbanístico	0	0	0	6	6
Datos de reanálisis	0	0	0	1	1

Tabla 3: Métodos aplicados en los estudios de la ICU en México

La percepción remota, la modelación, el uso de software aplicados en urbanismo y los datos de reanálisis, aparecen hasta este siglo, y aun así la suma de estos cuatro métodos es menor que la de los métodos tradicionales (comparación de termómetros, series de tiempo o recorridos con vehículo). No obstante, la aplicación de la percepción remota tiene una frecuencia relativamente alta con una tendencia al crecimiento, como se ve en la bibliografía contenida en el material suplementario (<https://drive.google.com/drive/folders/1mv4CaZc6LU13mtmvNiSy5B8V0oxuWHZx?usp=sharing>). Probablemente el primer estudio de la ICU superficial es el de Galindo-Estrada (2009) para la ciudad de Guadalajara, la segunda más poblada de México, ubicada al occidente del país. Para la Ciudad de México, Cui y De Foy (2012) combinaron imágenes satelitales y mediciones instrumentales para modelar las ICU, indagando sobre el papel de la vegetación en el comportamiento del fenómeno. Entre los estudios más recientes destaca el de Méndez-Astudillo et al. (2022), quienes relacionaron, con apoyo en imágenes satelitales, la ICU superficial y la contaminación atmosférica de la Ciudad de México.

El conteo de los enfoques o aplicaciones de los estudios se muestra en la Tabla 4. La mayoría corresponde al interés por el fenómeno en sí, seguido de dos aplicaciones

principalmente surgidas en este siglo: la planeación urbana y la mitigación de la ICU. Misma conclusión obtienen Sánchez et al. (2024) al analizar alrededor de 1300 publicaciones de la ICU a nivel mundial. No obstante, la utilidad de los estudios de la ICU en la planeación no ha resultado del todo clara en los trabajos publicados, y la necesidad de la mitigación de la ICU en beneficio del confort térmico tampoco se ha justificado plenamente.

Aplicación o enfoque	Prolegó- menos (antes de 1970)	Inicio formal (1970-1980)	Arranque (1980-2000)	Consolidación (2001-2024)	Total
El fenómeno en sí	4	2	15	55	76
Desarrollo urbano y planeación	0	1	4	23	29
Vulnerabilidad de población o ecosistemas	0	0	0	6	6
Mitigación de la ICU	0	0	0	27	27
Salud	0	0	1	2	3
Relación con el cambio o la variabilidad del clima	0	0	0	8	8
Calidad del aire/contaminación	0	1	3	2	6
Energía	0	0	0	2	2
Gestión hídrica	0	0	0	1	1

Tabla 4: Aplicación o enfoque de los estudios de ICU en México.

3. BALANCE DE ENERGÍA

Las mediciones de balance energético superficie/atmósfera en el mundo, y desde luego en la Ciudad de México –en 1985, 1993, 1994, 1995, 1998, 2010– así como en la ciudad desértica del noroeste mexicana, Mexicali, han mostrado que los usos del suelo pueden determinar la intensidad y la presencia o no de la ICU. Este balance es la base para explicar las ICU atmosféricas, es decir la del dosel y de la capa límite, por lo que deben consignarse los principales trabajos al respecto en México. El procedimiento más común consiste en mediciones simultáneas de la radiación neta, el calor almacenado en la superficie y los flujos atmosféricos turbulentos verticales de calor sensible y de calor latente. Las campañas realizadas en la Ciudad de México con fines urbanos –pues lo hay también con fines ecológicos o agrícolas, que no son considerados en esta comunicación– datan de mediados de la década de los ochenta, reportadas años después por Oke et al. (1992). Una segunda campaña, para la misma ciudad, se efectuó a mediados de la década de los noventa (Oke et al., 1999), y una más para un área suburbana (Barradas et al., 1999). Una revisión se puede ver en Tejeda-Martínez y Jáuregui-Ostos (2005). Como se dijo, otra ciudad que ha sido sujeto de diversas campañas de mediciones del balance de energía es Mexicali,

ubicada en la frontera con Estados Unidos, al noroeste de México, en medio de un desierto, por lo que sus resultados son de mucho interés (Tejeda-Martínez et al., 2016).

4. COMENTARIOS FINALES

Como han señalado Oke et al. (2017), la ICU no es un fenómeno de tal profundidad que abarque desde la superficie hasta superada la capa límite atmosférica, sino que puede presentarse en un estrato y no en otros. Tampoco es una condición permanente, sino que es más frecuente en las noches con calma y estabilidad atmosférica; en el periodo diurno puede incluso revertirse y el medio urbano ser menos cálido que los alrededores suburbanos o rurales. A partir de estas consideraciones aproximadas –que no son principios universales– es que debe verse el fenómeno. Resulta que en los periodos cálidos podría exacerbar las olas de calor nocturnas; por el contrario, podría ayudar a disminuir las condiciones adversas de las noches o madrugadas frías de los periodos invernales, sobre todo en las urbes elevadas de México (Ciudad de México, Guadalajara, Toluca, por ejemplo), o del norte del país (Mexicali, Tijuana, Monterrey). Por tanto, la moda de los trabajos sobre mitigación de la ICU no siempre es posible justificarla en términos de mejoría de las condiciones de bienestar térmico. Adicionalmente, cuando se presenta la ICU (en la atmósfera o en la superficie) no siempre lo hace como un patrón único, sino que se puede tratar de archipiélagos de calor, o incluso mosaicos de escala muy fina, sobre todo en la ICU superficial.

Varias de las propuestas de mitigación de la ICU consisten en alteraciones del albedo superficial mediante vegetación o cubriendo las superficies con colores claros; pero los efectos de estas acciones no necesariamente son lineales ni son los mismos para todas las ciudades; además de que el incremento de vegetación urbana en ambientes tropicales puede aumentar la incomodidad al inducir una mayor humedad ambiental. Entonces, la comprensión del fenómeno requiere fundamentalmente de mediciones térmicas y de balance de energía, o a través de modelación para plantear acciones útiles y factibles de mitigación.

Algunos errores que se han detectado en la bibliografía consultada, consisten en la falta de correcciones por altitud en la cartografía de isotermas de las ICU atmosféricas, sobre todo en trabajos iniciales (Tejeda y Acevedo, 1990; Lemus-Flores, 2016), recorridos con vehículo en horas de ocurrencia de las temperaturas máxima o mínima diarias, lo que impide la corrección por calentamiento o enfriamiento natural durante el periodo de mediciones (Lemus-Flores, 2016), ubicación incorrecta de termómetros que no miden valores representativos de su entorno (Méndez-Romero, 2016), inferencia del comportamiento de la ICU superficial a partir de una sola imagen (Lemoine-Rodríguez, et al., 2022), incompreensión de la complementariedad de análisis de isotermas y series de tiempo de temperatura (Lemoine-Rodríguez, et al., 2022), confusión entre las ICU atmosféricas y superficiales (Mora-Padilla, et al., 2021), entre otros. También es notorio que el concepto de zonas climáticas locales (Stewart y Oke, 2012) no se ha ido incorporando con suficiente celeridad como para facilitar las comparaciones entre entornos y comportamientos térmicos mediante un sistema estandarizado.

Los estudios e investigaciones presentadas en este trabajo son solo una muestra de los métodos, niveles altitudinales y enfoques de análisis que ha tenido la ICU en México.

Cuando las modificaciones climáticas globales y locales no eran temas de moda, Ernesto Jáuregui, en concordancia con otros investigadores de México y otros países, reconoció la importancia que a futuro tendría el estudio de la ICU. Las metodologías han tenido una rápida mejora en este siglo al incorporar herramientas que ofrecen técnicas refinadas y accesibles para los estudiosos de este fenómeno térmico.

La ICU superficial y la atmosférica tienen relación con la intensidad de las olas de calor o de frío y, por tanto, afectan a la población ciudadana, por lo que deben ser estudiadas a fondo. Al menos tienen efectos en los consumos energéticos para la climatización de edificios (Tejeda et al., 2022; Sisto et al., 2024) o en el confort de las personas, pero lo cierto es que no están cabalmente comprendidas las causas y consecuencias de la ICU, y en ninguno de los trabajos revisados se reportan efectos letales.

Los estudios de la ICU se están intensificando en el país, como lo muestran dos publicaciones monográficas de 2024: un libro sobre la ICU en América Latina, pero con la mayoría de los textos dedicados a México (Lemoine-Rodríguez, et al., 2024), y el número 114 de la revista *Investigaciones Geográficas*, del Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México, dedicada a la climatología urbana con motivo del centenario del nacimiento de Ernesto Jáuregui. Lo anterior, junto con lo mostrado en esta comunicación, indica que se está viviendo un auge del interés en la ICU en México, sobre todo en el uso de percepción remota para detección de la ICU superficial, asociado a la preocupación –no siempre justificada– de los peligros que encarna la ICU. La aplicación de inteligencia artificial a estudios de la ICU incipiente: apenas un trabajo donde esta tecnología se usa para la revisión bibliográfica mundial pero no para el estudio del caso in situ (Sánchez et al., 2024).

MATERIAL SUPLEMENTARIO

En la sección de Referencias solo aparecen las fichas de las publicaciones comentadas explícitamente en este documento. El total del material consultado se puede ver en: <https://drive.google.com/drive/folders/1mv4CaZc6LU13mtmvNiSy5B8V0oxuwHZx?usp=sharing>.

AGRADECIMIENTOS

A Aranza E. Baruch Vera, J. Omar Castro Díaz y René Gómez Díaz, por el apoyo en la recopilación bibliográfica.

REFERENCIAS

- Arshad, A., M. Ashraf, R.S. Sundari, H. Qamar, M. Wajid y M. Hasan. (2020). Vulnerability assessment of urban expansion and modelling green spaces to build heat waves risk resiliency in Karachi. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 46, 101468. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2019.101468>
- Balchin, W.G.V. y Pye, N. (1947). A micro-climatological investigation of bath and the surrounding district. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 73: 297-323. <https://doi.org/10.1002/qj.49707331706>

- Barradas, V. L., Tejeda, A. y Jáuregui, E. (1999). Energy balance measurements in a suburban vegetated area in Mexico City. *Atmospheric Environment*, (33), 4109-4113. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00152-1](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00152-1)
- Cui, Y. y De Foy, B. (2012). Seasonal variations of the urban heat island at the surface and the near-surface and reductions due to urban vegetation in Mexico City. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(5):855-868. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0104.1>
- Gáb, G.M. (1970). Investigaciones del clima de la ciudad de Puebla. 25-40. *Revista Comunicaciones de la Fundación Alemana*, Vol. 17: 25-40.
- Galindo-Estrada, I G. (2009). A satellite time slots climatology of the urban heat island of Guadalajara Megacity in Mexico from NOAA/AVHRR THERMAL infrared monitoring. *European Geosciences Union General Assembly*. Viena, Austria: EGU, 2009. 12796. Recuperado de <https://tinyurl.com/5ad7253h>
- Howard, L. (2006). *The Climate of London* (edición facsimilar a partir de los 3 volúmenes de 1833). Göteborg: International Association for Urban Climate, 262 p.
- Jáuregui-Ostos, E. (1971). *Mesomicroclima de la Ciudad de México*, Dir. Gral. de Publ.-UNAM, Primera Ed., México.
- Lemoine-Rodríguez, R., Inostroza, L., Falfán, I., McGregor-Fors, I. (2022). Too hot handle? On the cooling capacity of urban green spaces in a Neotropical Mexican city. *Urban Forestry and Urban Greening* 74 127633. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127633>
- Lemoine-Rodríguez, R., Pérez-Vega, A., Mas, J-F. *Coordinadores* (2024). *Avances en el estudio de islas de calor urbano en América Latina*. Universidad Nacional Autónoma de México y Universidad de Guanajuato. 398 p.
- Lemus-Flores, S. (2016). *Isla de calor en la Ciudad de Puebla*. Tesis de Licenciatura en Geografía, UNAM. 123 p.
- Luyando, E. (2016). *Efectos de las temperaturas y precipitaciones extremas en el bioclima humano de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México por cambio climático local y global*. Tesis de Doctorado, Facultad de Filosofía y Letras de la UNAM.
- Malaspina, A. (1885). *Viaje político-científico alrededor del mundo por las corbetas Descubierta y Atrevida al mando de los capitanes de navío D. Alejandro de Bustamante y Don José de Bustamante y Guerra desde 1789 a 1794*. Imprenta de la Viuda e Hijos de Abienzo. 778 p.
- Méndez-Astudillo J., Caetano E., Pereyra-Castro K. (2022). Synergy between the Urban Heat Island and the Urban Pollution Island in Mexico City during the Dry Season. *Aerosol and Air Quality Research*, 22(8). <https://doi.org/10.4209/aaqr.210278>
- Méndez-Pérez, I.R., Tejeda-Martínez, A., Lino-Solano, J.J. y Rivero-Blanco, C.O. (2023). Vigencia de la detección de la isla de calor urbana mediante recorridos: dos ejemplos en el oriente de México. *Investigaciones Geográficas*, Instituto de Geografía, UNAM. Núm. 112. <https://doi.org/10.14350/rig.60729>
- Méndez-Romero, E. A. (2016). *Alteraciones térmicas derivadas de la urbanización en la ciudad de Xalapa, Veracruz. Análisis espacial y temporal: 1982-2015*. Tesis de Maestría, El Colegio de Veracruz.

- Mora-Padilla, K., Gómez-Mora, B., Cruz, C. y Santes-González, A. (2021). Aplicación de los productos de la Percepción Remota para identificar la Isla de Calor Urbana en Xalapa. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26301.27366>
- Moreno y Anda, M. (1895). Comparación de los climas de México y Tacubaya. En Aguilar y Santillan, R. Memorias de la Sociedad Científica “Antonio Alzate”, tomo IX, 1895-1896, pp. 397-407.
- Oke, T., Mills, G., Christen, A. y Voogt, J.A. (2017). Urban climates. Cambridge University Press, 509 p.
- Oke, T. R., Spronken-Smith, R. A., Jáuregui, E. y Grimmond, C. S. (1999). The energy balance of central Mexico City during the dry season. *Atmospheric Environment*, (33), 3919-3930. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00134-X](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00134-X)
- Oke, T. R., Zeuner, G. y Jáuregui, E. (1992). The surface energy balance in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 26B(4), 433-444. [https://doi.org/10.1016/0957-1272\(92\)90050-3](https://doi.org/10.1016/0957-1272(92)90050-3)
- Peppler, A. (1929). Das Auto als Hilfsmittel der meteorologischen Forschung. *Zeitschrift für angewandte Meteorologie*, 46, 305-308
- Riquelme, D. (1968). Microclimas del área metropolitana de la Ciudad de México. *Anuario de Geografía*, 8. 103-105.
- Sánchez, F.A., M. Vega, A.A. Castillo, J.T. López, M. Cruz, E. Camacho y J. Rodríguez. (2024). Geo-sensing-based analysis of urban heat island in the metropolitan area of Merida, Mexico. *Sensors*. 24, 6289. <https://doi.org/10.3390/s24196289>
- Sisto, N. P., Vivas Pacheco, H., & Lara-Díaz, E. (2024). Consumos de energía eléctrica bajo un contexto de temperaturas extremas e isla de calor en el norte de México. *Investigaciones Geográficas*, (114). <https://doi.org/10.14350/rig.60851>
- Stewart, I.D., y T.R. Oke, 2012: Local Climate Zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93,1879–1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
- Tejeda-Martínez, A. y Acevedo F. (1990). <https://doi.org/10.3390/s24196289> La Ciencia y el Hombre. 6:37-48. Recuperado de <https://cdigital.uv.mx/handle/123456789/5077>
- Tejeda-Martínez, A., García-Cueto, O. R., Aquino-Martínez, L. P. y Nava-Assad, M. (2016). Simple statistical models of surface/atmosphere energy fluxes and their hysteresis in a desertic Mexican city (Mexicali). *Atmósfera*, 29(2), 129-139. <https://doi.org/10.20937/ATM.2016.29.02.03>
- Tejeda-Martínez A. y E. Jáuregui, 2005. Surface energy-balance measurements in the Mexico City region: A review. *Atmósfera* **18**, 1-23. Recuperado de <https://tinyurl.com/3v9n982m>
- Tejeda-Martínez, A., Méndez-Pérez, I.R. y Cruz-Pastrana, D.A. (2022). Domestic Electricity Consumption in Mexican Metropolitan Areas under Climate Change Scenarios. *Atmósfera*, 35(3): 449-465. <https://doi.org/10.20937/ATM.52902>
- Tejeda-Martínez, A., Méndez-Pérez, I.R. y Luyando-López, E. (2024). Contribuciones de Ernesto Jáuregui a las ciencias atmosféricas en México, con énfasis en la climatología urbana. *Investigaciones Geográficas*. 114, e60845. <https://doi.org/10.14350/rig.60845>

Tejeda-Martínez, A., Méndez-Pérez, I.R. y Luyando-López, E. (2025). Evolución de la climatología urbana en México 1791-2024: PANORÁMICA. Ver en este mismo volumen.

Vargas, N. y V. Magaña (2020). Warm Spells and Climate Risk to Human Health in the Mexico City Metropolitan Area. *Weather, Climate and Society*, 12: 351-365. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-19-0096.1>

EVOLUCIÓN DE LA CLIMATOLOGÍA URBANA EN MÉXICO 1791-2024: PANORÁMICA.

Adalberto TEJEDA-MARTÍNEZ¹, Irving Rafael MÉNDEZ-PÉREZ² y Elda LUYANDO³ y R. R. GÓMEZ-DÍA¹

¹Grupo de Climatología Aplicada de la Universidad Veracruzana (México)

²Centro de Ciencias de la Tierra de la Universidad Veracruzana (México)

³Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la Universidad Nacional Autónoma de México

atejeda.martinez@gmail.com, irmendez@uv.mx, ellu@atmosfera.unam.mx
renedg03@gmail.com

RESUMEN

El primer atisbo de climatología urbana en México se ubica en 1791, cuando Antonio de Pineda realizó mediciones de temperatura en la ciudad de Celaya y sus alrededores. Cien años después, Moreno y Anda hizo lo mismo para la Ciudad de México, aunque el desarrollo sistemático de la disciplina ocurre en las siete décadas recientes. Se presentará una panorámica de la evolución de los estudios de los efectos de la urbanización en la temperatura, la precipitación y el balance hídrico, la humedad atmosférica, los balances de radiación y de energía, el viento y el bioclima humano. Esta evolución se agrupa en cuatro periodos: antes de 1970, los prolegómenos; de 1971 a 1980, el inicio formal; entre 1981 a 2000, el arranque; y de 2001 a 2024 la consolidación. Se mostrará que en la segunda y tercera etapas la predominancia de los trabajos de Ernesto Jáuregui y colaboradores aplicados principalmente a la Ciudad de México, son enriquecidos por nuevas generaciones de autores y enfocados a ciudades distribuidas en todo el país. La revisión abarca cerca de 350 publicaciones; 33 en el primer periodo, 84 en el segundo y, en el tercero, 230.

Palabras clave: climatología urbana, México, isla de calor urbana.

ABSTRACT

The first glimpse of urban climatology in Mexico dates to 1791, when Antonio de Pineda made temperature measurements in the city of Celaya and its surroundings. One hundred later, Moreno y Anda did the same for Mexico City, although the systematic development of the discipline occurs in the recent seven decades. An overview of the evolution of studies on the effects of urbanization on temperature, precipitation and water balance, atmospheric humidity, radiation and energy balances, wind and human bioclimate will be presented. This evolution is grouped into four periods: before 1970, the prolegomena; from 1971 to 1980, the formal beginning; between 1981 to 2000, the start; and from 2001 to 2024 consolidation. It will be shown that in the second and third stages the predominance of the works of Ernesto Jáuregui and collaborators applied mainly to Mexico City, are enriched by new generations of

authors and focused on cities distributed throughout the country. The review covers nearly 350 publications: 33 in the first period, 84 in the second and, in the third, 230.

Key words: urban climate, Mexico, urban heat island.

1. INTRODUCCIÓN

La climatología urbana estudia, principalmente, las alteraciones climáticas debidas a la urbanización (Oke, 1984), desde el punto de vista de sus procesos físicos y químicos. El Primer Simposio Internacional sobre Climas Urbanos y Edificaciones se efectuó en Bruselas en 1968, convocado por la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 1970), y significó un impulso a la investigación en esta área, particularmente de la isla de calor urbana (ICU en lo sucesivo) en diversas latitudes. En el medio siglo anterior, se habían estudiado alrededor de 250 ciudades (Stewart 2011; Santamouris, 2020): una decena en África, 40 en Norteamérica y Latinoamérica, y el resto dividido a partes iguales entre Europa y Asia junto con Australia.

En este documento se revisa lo publicado sobre la climatología urbana de México. No se consideran la calidad del aire, ni emisiones de gases de efecto invernadero ni riesgos o desastres por hidrometeoros.

Tejeda-Martínez y Jáuregui-Ostos (2004) localizaron 68 publicaciones para las cuatro décadas finales del siglo XX, pero considérese que entonces no estaban disponibles ficheros ni bases de datos confiables en internet. El 40% estaba dedicado a la Ciudad de México (CDMX en lo sucesivo) y 60% a otras urbes (Guadalajara, Monterrey, Mexicali, Toluca y Xalapa, principalmente). Para entonces no se habían utilizado sensores remotos y la modelación en climatología urbana era incipiente.

La presente revisión bibliográfica se divide en cuatro periodos: antes de 1970 (los prolegómenos), 1970-1980 (los inicios) domina como zona de estudio la CDMX, y un alto porcentaje de las publicaciones son de Ernesto Jáuregui y sus colaboradores, particularmente sobre la ICU atmosférica. Entre 1981 y 2000 (el arranque) emergen otras ciudades de interés y comienzan estudios sobre otras variables atmosféricas además de la temperatura y sobre la ICU superficial y en lo que va del siglo (la consolidación), aparecen otras ciudades, se diversifican los autores, los enfoques y las variables estudiadas (ver Figs. 1 y 2).

La revisión que se discute en el presente documento tuvo como fuente búsquedas en internet bajo las palabras clave de clima urbano en México, ICU y los temas mostrados en la Fig. 2. El más recurrente y de evolución sostenida es el de las alteraciones térmicas (Fig. 3). Los artículos de investigación son las publicaciones más frecuentes, pero un papel relevante lo ocupan las tesis de grado y capítulos de libros, por cierto, no siempre accesibles en internet, y por tanto no contabilizados en la Fig. 4. (El total de las publicaciones revisadas se puede consultar en https://drive.google.com/drive/folders/18ep-hnfQm2D3bBit7_awG9OxVNVOA6hq?usp=sharing).

1.1. PROLEGÓMENOS E INICIO FORMAL

Son notorias dos indagaciones pioneras sobre las alteraciones térmicas debidas a la urbanización mencionadas por Méndez-Pérez et al. (2023): una sobre las ciudades de

Celaya, en 1791, y otra sobre la CDMX de 1895-96. La ICU, sus métodos y enfoques, se analiza en otra comunicación de este volumen (Tejeda-Martínez, et al., 2025). En estos periodos (antes de 1970 y 1871 a 1980) se encontraron 33 publicaciones distribuidas en diez autores, de los cuales Ernesto Jáuregui fue el autor principal en 23 publicaciones y tres en coautoría, es decir, el 79% de los trabajos.

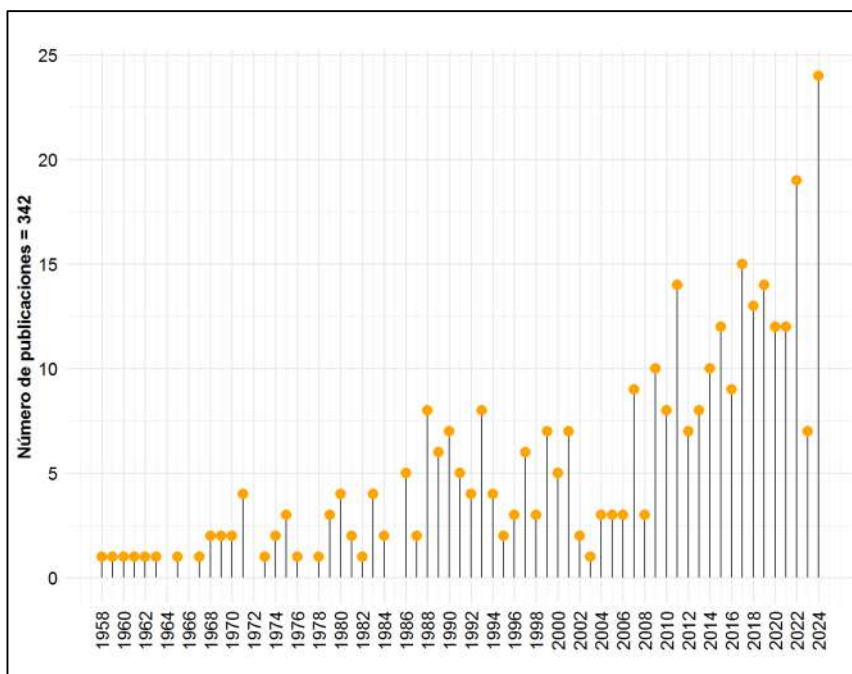


Fig. 1: Evolución numérica de las publicaciones de climatología urbana en México, de 1958 a 2024. Fuente: elaboración propia.

Entre 1958 y 1960 aparecen los primeros estudios sobre visibilidad y turbiedad. Jáuregui (1958) encuentra que la turbiedad del aire en la CDMX se debía a las tolvaneras, las que a su vez eran originadas por los vientos turbulentos de la convección local –ya sea con presencia de nubes o sin ellas– sobre suelos desnudos. Además, las tolvaneras de un año no estaban correlacionadas con la precipitación del año previo (Jáuregui, 1960). El mismo trabajo reporta que a lo largo de un periodo de 15 años ocurrió una reducción notoria de la visibilidad, fenómeno que ya se había anticipado en la publicación de dos años antes, y no necesariamente atribuido a las tolvaneras (Jáuregui 1958). Para los suelos aledaños al lago de Texcoco, Jáuregui (1970, 1971a) estudió los mecanismos de erosión eólica en diferentes ciudades del territorio nacional.

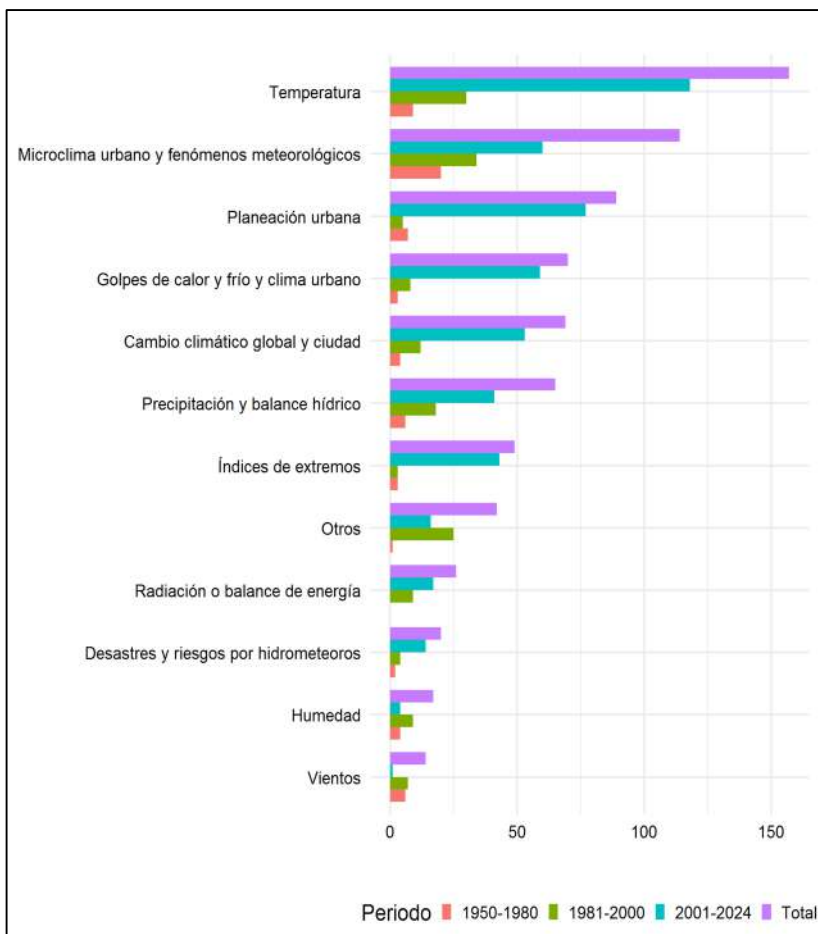


Fig. 2: Temas estudiados en la climatología urbana sobre México, para tres periodos: 1950-1980, 1981-2000 y 2001-2024. Fuente: elaboración propia.

A finales de los 60 del siglo pasado, la geógrafa Dolores Riquelme Vértiz, al estudiar los microclimas en la CDMX, encuentra una diferencia de temperatura entre un sitio urbano de 2°C con respecto a las afueras (Riquelme, 1968).

Jáuregui (1971b) inicia lo que iba a desarrollar en las siguientes tres décadas sobre la ICU y otros aspectos como los bioclimáticos de la ciudad o al interior de edificaciones, pero un impulso importante lo constituyeron tres reuniones científicas ocurridas en México durante la segunda mitad de los 1980: la Conferencia Técnica Sobre Climatología Urbana y sus Aplicaciones con Especial Atención a Zonas Tropicales (WMO, 1986) en 1984 en la CDMX; el III Congreso de la Organización Mexicana de Meteorólogos (OMMAC, 1988), en 1988 también en la CDMX, que incluyó mesas sobre la climatología urbana, y el Primer Simposio Internacional sobre Contaminación

del Aire y Clima Urbano, en noviembre de 1990, en Guadalajara, convocado por la Organización Meteorológica Mundial y la OMMAC (OMM y OMMAC, 1990).

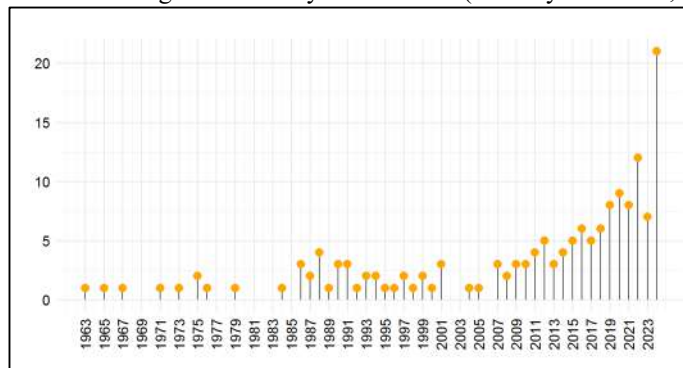


Fig. 3: Evolución numérica de las publicaciones de climatología urbana sobre México, centradas en las alteraciones térmicas, de 1963 a 2024. Fuente: elaboración propia.

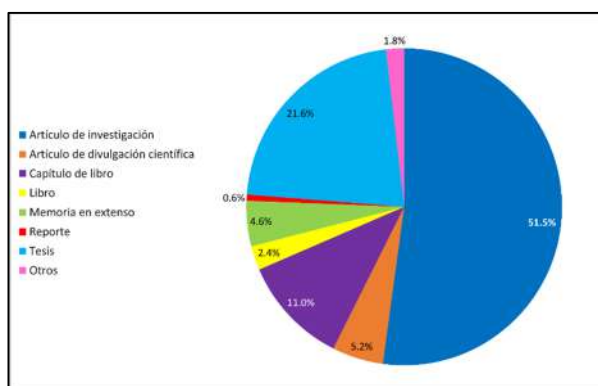


Fig. 4: Distribución por tipo de publicación de los 347 textos localizados y revisados, para el periodo de 1950 a 2024. Fuente: elaboración propia.

Los trabajos de Ernesto Jáuregui (1959, 1973, 1979) concernientes al comportamiento de la precipitación en el territorio nacional comienzan con un estudio a lo largo del periodo 1900-1958 en Tacubaya; en 1979 el propio Jáuregui traza una generalización (con el objetivo de estudiar fluctuaciones pluviométricas) para varias ciudades del territorio nacional a lo largo de los cien años previos. En esta línea de investigación, Maderey (1980) realiza un estudio extenso de la relación entre la intensidad de las precipitaciones y su frecuencia para diferentes meses del año en el valle de México. A una escala espacial menor se observa, en la década de 1970, el fenómeno de isla de lluvia asociada a corrientes convectivas debidas al calentamiento por radiación solar de superficies urbanas y a la turbulencia, principalmente (Jáuregui, 1974).

En el estudio de las condiciones necesarias para el confort humano en relación con las condiciones meteorológicas la temperatura de bulbo húmedo se constituye en la variable relevante para establecer el índice de incomodidad. Las condiciones óptimas de comodidad se encuentran en las porciones noroeste y centro de la gran meseta mexicana (Jáuregui, 1967). Jáuregui (1971c) analizó la variación de la temperatura en dos clínicas de la CDMX (simultáneamente).



*Fig. 5: Número de publicaciones dedicadas a distintas ciudades o zonas urbanas.
Fuente: elaboración propia.*

2. PERIODO DE ARRANQUE: 1981 - 2000

En estas dos décadas se incrementaron 2,5 veces las publicaciones con respecto al periodo anterior; se contabilizaron 84 publicaciones en total. La Fig. 2 evidencia el creciente interés en investigar sobre los efectos de la urbanización sobre la temperatura del aire y eventualmente de la superficie. La CDMX sigue siendo la más estudiada en su conjunto o partes de ellas, como se muestra en la Fig. 5.

Nuevamente el doctor Jáuregui Ostos tiene la mayor participación ya sea como autor o coautor, en un 56% del total de este periodo.

Aplicando series de tiempo para el periodo 1961-1980, Rubí-Sandoval (1991) corrobora los efectos de la urbanización en clima térmico de la CDMX.

Jáuregui analizó las consecuencias de la urbanización en las tendencias de temperatura de 1900 a 1990 (Jáuregui, 1995) y su conexión con el balance de energía entre la superficie y el aire, asunto que retomará dos años después (Jáuregui, 1997). Ruiz-Hernández (1994) se ocupó en general de los cambios climáticos –no solo térmicos– sufridos por la ciudad como consecuencia de su crecimiento anárquico. Toudert (1996) buscó la articulación de los climas interregionales y la ICU atmosférica de la

CDMX. El libro de Jáuregui (2000) constituye una visión clara y concisa del clima urbano de la ciudad. Otras ciudades estudiadas en este periodo fueron Aguascalientes, para la cual Lemus y Gay (1988) detectaron las variaciones de la temperatura y la precipitación de 1921 a 1985 por causas locales. Barradas (1987) y Tejeda y Acevedo (1990) publicaron sobre la ICU atmosférica en la ciudad de Xalapa.

Años más tarde, Luna-González (1997) realizó un trabajo pionero en la simulación del clima termal y calidad del aire de la CDMX mediante un modelo meteorológico no hidrostático.

Al crecimiento en extensión y en cantidad de las urbes mexicanas en este periodo, correspondió el incremento de estudios sobre consecuencias de los fenómenos meteorológicos en la calidad del aire. Por ejemplo, los trabajos de Jáuregui (1983a, 1983b) sobre la mejoría de la visibilidad atmosférica, otro posterior (Jáuregui, 1988) sobre el incremento de la contaminación atmosférica, y un poco después (Jáuregui, 1989) sobre la disminución de tolvaneras en el valle de México.

Se observa para este periodo cómo se multiplican trabajos que utilizan índices bioclimáticos en ciudades tropicales y se generan cartografías de la temperatura de bulbo húmedo (Jauregui, 1990a; Robles-Gil, 1998).

Respecto a los estudios de precipitación y balance hídrico, se muestran incrementos en aspectos relacionados con el crecimiento urbano, como las precipitaciones convectivas de la CDMX, o la influencia del Bosque de Chapultepec en el clima de la ciudad (Jáuregui, 1990b).

Sobre humedad atmosférica urbana, Barradas (1991) analiza el papel de las áreas verdes de la CDMX en la temperatura vía el consumo de calor latente, y Jáuregui y Tejeda (1997) analizan el contraste de humedad urbano-rural para la misma ciudad.

3. PERIODO DE CONSOLIDACIÓN: 2001 A 2024

Para lo que va del siglo se localizaron 225 trabajos. Se duplicaron las publicaciones con respecto al periodo anterior, y las tesis de grado y pregrado pasaron de 15 a 60 (Tabla 1). Los sitios de mayor interés fueron la CDMX, Puebla, Veracruz y Xalapa. Sin embargo, se debe puntualizar que en este periodo se encontró poco interés en el estudio del viento y la humedad en sitios urbanos. Sobre esta última variable, Tejeda-Martínez et al. (2024) localizaron únicamente 46 artículos publicados a nivel mundial de 1960 a 2022.

Licenciatura	Especialidad	Maestría	Doctorado
28	3	24	5

Tabla 1. Tesis publicadas sobre clima urbano en México durante el periodo 2001-2024. Para ver la lista completa, visitar https://drive.google.com/drive/folders/18ep-hnfQm2D3bBit7_awG9OxVNV0A6hq?usp=sharing

Los estudios sobre la ICU siguieron ampliándose a otros centros urbanos, por ejemplo, en Monterrey (Rivera-Rivera, 2012), Tampico (Evans y Schiller, 2005), Ciudad Juárez (Contreras-Cardosa et al., 2008), Mexicali (García-Cueto et al., 2007), Torreón (Villanueva-Solís et al., 2022), Hermosillo (López-González et al., 2021; Mercado-

Maldonado, 2022), Poza Rica (Hernández y Segura, 2012; Parada, 2013), entre otros. También se han ido incorporando la percepción remota y la modelación numérica para la identificación o cuantificación de la ICU, como en los trabajos de Ballinas y Barradas (2016), Dialesandro et al. (2019), Galindo (2009, 2010) y Rivera et al. (2017). Recientemente, empieza a emplearse el uso del dron (Grajeda et al., 2018) y la dinámica de fluidos computacionales (Grajeda, 2020; Grajeda et al., 2022).

4. COMENTARIOS FINALES

Si bien los estudios de clima urbano en México han incrementado su número de forma notable en lo que va del siglo, todavía se observa un rezago puesto que no todas las ciudades de más de cien mil habitantes, por ejemplo, han sido estudiadas al menos una vez desde la perspectiva de la climatología urbana. Destaca el caso de Monterrey, capital del estado de Nuevo León, ubicada al norte del país, con una actividad industrial fuerte y una población conurbada de 5 millones de habitantes, de la que se encontraron menos de 5 publicaciones en las siete décadas recientes. Las ciudades en que más estudios se han realizado son aquellas que cuentan con grupos académicos relacionados con los estudios del clima, entre ellas tres de las grandes del país: Ciudad de México, desde luego, con una población conurbada de 20 millones; Guadalajara (5,5 millones en la conurbación), Puebla (casi pionera en climatología urbana; con 3,2 millones de habitantes), y otras urbes medias como Xalapa (0,8 millones en la conurbación).

Este rezago no es únicamente en cuanto a la cantidad, sino también en cuanto a la utilización de los resultados que no han incidido en los planes de desarrollo de las ciudades.

El tema más estudiado es el de la ICU, por lo que se discutirá en otra comunicación en este mismo volumen (Tejeda-Martínez, et al., 2025).

MATERIAL SUPLEMENTARIO

En la sección de Referencias solo aparecen las fichas de las publicaciones comentadas explícitamente en este documento. El total del material consultado se puede ver en https://drive.google.com/drive/folders/18ep-hnfQm2D3bBit7_awG9OxVNVOA6hq?usp=sharing

AGRADECIMIENTOS

A Raquel E. Hernández Parra, Aranza E. Baruch Vera y J. Omar Castro Díaz, por su apoyo en recabar información.

REFERENCIAS

Ballinas, M. y Barradas, V. L. (2016). The Urban Tree as a Tool to Mitigate the Urban Heat Island in Mexico City: A Simple Phenomenological Model. *Journal of Environmental Quality*. 45(1):157-66. doi: <https://doi.org/10.2134/jeq2015.01.0056>

- Barradas, V. L. (1987). Evidencia del efecto de “Isla térmica” en Jalapa, Veracruz, México. *Revista Geofísica*, (26), 125-135. Recuperado de <https://tinyurl.com/3pfvunkz>
- Barradas, V.L. (1991). Air temperature and humidity and human comfort index of some city parks of Mexico City. *International Journal of Biometeorology*, 35:24-28. doi: <https://doi.org/10.1007/BF01040959>
- Contreras-Cardosa, A., Salas-Plata Mendoza, J.A., Velázquez-Angulo, G. y Quevedo-Urías, H. (2008). Determinación de la isla de calor urbano en Ciudad Juárez mediante programa de cómputo. *Cultura Científica y Tecnológica*. 26(5):3-16. Recuperado de <https://revistas.uacj.mx/ojs/index.php/culecyt/article/view/393>
- Dialesandro, J.M., Wheeler, S.M. y Abunnasr, Y. (2019). Urban heat islands behaviors in dryland regions. *Environmental Research Communications*. 1:081005. doi: <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ab37d0>
- Evans, J.M., y Schiller, S. (2005). La isla de calor en ciudades con clima cálido-húmedo: el caso de Tampico, México. *Avances de Energías Renovables y Medio Ambiente*. 9:37-42. Recuperado de <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/83074>
- Galindo, I. (2009). A satellite time slots climatology of the urban heat island of Guadalajara Megacity in Mexico from NOAA/AVHRR THERMAL infrared monitoring. *European Geosciences Union General Assembly*. Viena, Austria: EGU, 2009. 12796. Recuperado de <https://tinyurl.com/5ad7253h>
- Galindo, I. (2010). Identificación y estudios de las islas urbanas de calor de las ciudades de Guadalajara y Colima, propuestas de estrategias de mitigación. *Primer Encuentro Académico CONAVI-CONACYT*. 43. Recuperado de <https://n9.cl/dl6zf>
- García-Cueto O. R., Jáuregui, E., Toudert, D. y Tejeda-Martínez, A. (2007). Detection of the urban heat island in Mexicali, B. C., Mexico and its relationship with land use. *Atmósfera*, 20(2):111-131. Recuperado de <https://n9.cl/b6bav>
- Grajeda, R.M. (2020). Calor antropogénico vehicular en los parámetros físicos de un cañón urbano. Para un clima cálido húmedo. Tesis de doctorado. Facultad de Arquitectura, Programa Interinstitucional de Doctorado en Arquitectura. Universidad Autónoma de Aguascalientes, Universidad de Colima, Universidad de Guanajuato y Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Grajeda, R. M., Alonso, E. M. y Esparza, C. J. (2018). Vehicular anthropogenic heat in the physical parameters of an urban canyon for warm humid climate. *34th International Conference on Passive and Low Energy Architecture*. 225-230. Recuperado de <https://tinyurl.com/mrbzmd54>
- Grajeda, R.M., Alonso, E.M., Escobar, C., Esparza, C.J., Sotelo, C., Martínez, W. Mondragón, M. y Cabrera, A. (2022). Anthropogenic Vehicular Heat and Its Influence on Urban Planning. *Atmosphere*. 13, 1259. <https://doi.org/10.3390/atmos13081259>
- Hernández, M. y Segura. P. (2012). Determinación de la isla de calor en la ciudad de Poza Rica, Ver por efectos antropogénicos. *Tesina de la Licenciatura de Ingeniería Ambiental*. Poza Rica, Ver. 32 pp.
- Jáuregui, E. (1958). El aumento de la turbiedad del aire en la Ciudad de México. *Ingeniería Hidráulica en México*. 12(3), 9-18.
- Jáuregui, E. (1959). Notas sobre la precipitación en Tacubaya para el periodo 1900-1958. *Ingeniería Hidráulica en México*. 13, 29-39.

- Jáuregui, E. (1960). Las tolvaneras del Valle de México. *Ingeniería Hidráulica en México*. 14(4), 60-66.
- Jáuregui, E. (1967). Notas sobre la precipitación en Tacubaya para el periodo 1900-1958. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. 13. pp. 29-39.
- Jáuregui, E. (1970). La erosión hidráulica y eólica en México y sus efectos en las estructuras hidráulicas y en los núcleos de población. *Boletín del Instituto de Geografía*. Instituto de Geografía, UNAM. No. 3. doi: <https://doi.org/10.14350/rig.58845>
- Jáuregui, E. (1971a) La erosión eólica en los suelos vecinos al lago de Texcoco. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XXV No. 2
- Jáuregui, E. (1971b). Mesomicroclima de la Ciudad de México. Instituto de Geografía, UNAM. Imprenta Universitaria.
- Jáuregui, E. (1971c). Evaluación del bioclima en dos clínicas de la Ciudad de México. *Boletín del Instituto de Geografía*. UNAM. Vol. 4. 1971. doi: <https://doi.org/10.14350/rig.58859>
- Jáuregui, E. (1973). The urban climate of Mexico City. *Erdkunde*. 27(4), 298-307. doi: <https://doi.org/10.3112/erdkunde.1973.04.06>
- Jáuregui, E. (1974). La isla de lluvia de la ciudad de México. *Ingeniería Hidráulica*. Vol. 3 (2).
- Jáuregui, E. (1979). Algunos aspectos de las fluctuaciones pluviométricas en México en los últimos cien años. *Boletín del Instituto de Geografía*. No. 9. 1979. doi: <https://doi.org/10.14350/rig.58914>
- Jáuregui, E. (1983a). Variaciones de largo periodo de la visibilidad en la Ciudad de México. *Geofísica Internacional*. 22(3), 251-275. doi: <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.1983.22.3.868>
- Jáuregui, E. (1983b). Visibility trends in Mexico City. *Erdkunde*. 37:296-299. doi: <https://doi.org/10.3112/erdkunde.1983.04.06>
- Jáuregui, E. (1988). Efectos de la urbanización en el clima del valle de México. *Momento Económico*, (41-42), 6-7. Recuperado de <https://n9.cl/2hc8>
- Jáuregui, E. (1989). The dust storms of Mexico City. *International Journal of Climatology*, 9:169-180. doi: <https://doi.org/10.1002/joc.3370090205>
- Jáuregui, E. (1990a). Distribución de la temperatura efectiva en México. *Memorias de la II Reunión Nacional de Energía y Confort*. Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ingeniería, mayo 23 al 25 de 1990. 136-139p.
- Jáuregui, E. (1990b). Influence of a large urban park on temperature and convective precipitation in a tropical city. *Energy and Buildings*, 15-16:457-463. doi: [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(90\)90021-A](https://doi.org/10.1016/0378-7788(90)90021-A)
- Jáuregui, E. (1995). Algunas alteraciones de largo período del clima de la Ciudad de México debidas a la urbanización. *Revisión y perspectivas*. *Boletín del Instituto de Geografía-UNAM*. 31, 9-44. doi: <https://doi.org/10.14350/rig.59035>
- Jáuregui, E. (1997). The last Ms for 40th anniversary issue. *Aspects of urban human biometeorology*. *International Journal of Biometeorology*. 40, 58-61. doi: <https://doi.org/10.1007/BF02439413>
- Jáuregui, E. y Tejeda, A. (1997). Urban-rural humidity contrasts in Mexico City, *International Journal of Climatology*, 17(2), 187-196. doi:

[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(199702\)17:2<187::AID-JOC114>3.0.CO;2-P](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(199702)17:2<187::AID-JOC114>3.0.CO;2-P)

- Jáuregui, E. (2000). El clima de la Ciudad de México. Plaza y Valdez (eds). 129pp.
- Lemus, L. y Gay, C. (1988). Temperature, precipitation variations and local effects Aguascalientes 1921-1985. *Atmósfera*, 1, 39-44. Recuperado de <https://n9.cl/44oyr>
- López-González, F.M., Navarro-Navarro, L.A., Díaz-Cervantes, R.E. y Navarro-Estupiñán, J. (2021). Vegetation cover and urban heat islands/oases distribution in Hermosillo City, Sonora. *International Journal of Borders, Territories and Regions*. 33(6). doi: <https://doi.org/10.33679/rfn.v1i1.2088>
- Luna-González, E. (1997) Simulación del clima termal y la calidad del aire en el Valle de México, usando un modelo meteorológico no-hidroestático. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Maderey, L. E. (1980). Intensidad de la precipitación en el Valle de México. *Investigaciones Geográficas*, n.10, pp.7-53. ISSN 2448-7279.
- Méndez-Pérez, I.R., Tejeda-Martínez, A., Lino-Solano, J.J. y Rivera-Blanco, C.O. (2023). Vigencia de la detección de la isla de calor urbana mediante recorridos: dos ejemplos en el oriente de México. *Investigaciones Geográficas*, 112: e60729. doi: <https://doi.org/10.14350/rig.60729>
- Mercado-Maldonado, L. (2022). Mitigación y adaptación al efecto de isla de calor urbana de clima cálido seco. El caso de Hermosillo, Sonora. *Vivienda y Comunidades Sustentables*, 6(11): 85-110. doi: <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i11.187>
- Oke, T. (1984). Methods in urban climatology. En *Applied Climatology*. Kirchhofer, W., Ohmura, A. and Wanner, H. (eds.), ETH Geog. Instit., Zurich, 19-29.
- OMMAC. (1988). Memorias del III Congreso Nacional y III Congreso Iberoamericano de Meteorología. México, D.F., 14 al 18 de noviembre. Organización Mexicana de Meteorólogos, A.C.
- OMM y OMMAC. (1990). Memorias del Primer Simposio Internacional sobre Contaminación del Aire y Clima Urbano. Guadalajara, Jalisco, 19 al 22 de noviembre. Organización Meteorológica Mundial y Organización Mexicana de Meteorólogos, A.C.
- Parada, M.G. (2013). Evaluación preliminar de la isla de calor en Poza Rica, Veracruz. Tesis de Especialidad en Diagnóstico y Gestión Ambiental, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Veracruzana.
- Riquelme, D. (1968). Microclimas del área metropolitana de la Ciudad de México. *Anuario de Geografía*, 8. 103-105.
- Rivera-Rivera, A. L. (2012). Urban Heat Islands in Monterrey, Mexico, using remote sensing imagery and geographic information systems analysis. Tesis de Maestría, División de Ingeniería y Arquitectura. ITES de Monterrey.
- Rivera, E., Antonio, X., Origel, G., Sarricolea, P. y Adame, S. (2017). Spatiotemporal analysis of the atmospheric and surface urban heat islands of the Metropolitan Area of Toluca, Mexico. *Environmental Earth Sciences*. 76, 225. doi: <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6538-4>
- Robles-Gil, M. S. G. (1998). El clima en la ciudad de La Paz, Baja California Sur. Tesis de Maestría. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM.

- Rubí-Sandoval, M.E. (1991). Cambios en la temperatura y precipitación de la Ciudad de México debidos a la urbanización durante el periodo 1961-1980. Tesis de Licenciatura en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM.
- Ruiz-Hernández, J.A. (1994). Cambios climáticos en la Ciudad de México. Tesis de Licenciatura en Geografía, Colegio de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM.
- Santamouris, M. (2020). Recent progress on urban overheating and heat island research. Integrated assessment of the energy, environmental, vulnerability and health impact. Synergies with the global climate change. *Energy and Buildings*. 207, 109482. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109482>
- Stewart, I.D. (2011). A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. *International Journal of Climatology*. 31:200-217. doi: <https://doi.org/10.1002/joc.2141>
- Tejeda-Martínez, A. y Acevedo, F. (1990). Alteraciones climáticas por la urbanización en Xalapa, Ver. *La Ciencia y el Hombre*. 6:37-48. Recuperado de <https://cdigital.uv.mx/handle/123456789/5077>
- Tejeda-Martínez, A., y Jáuregui-Ostos, E. (2004). Cuatro décadas de climatología urbana en México. En M. Rodríguez-Viqueira (Ed.), *Estudios de Arquitectura Bioclimática* (Vol. 6, págs. 163-178). México: LIMUSA- UAM Iztapalapa.
- Tejeda-Martínez, A., Méndez-Pérez, I.R. y Luyando-López, E. (2024). Contribuciones de Ernesto Jáuregui a las ciencias atmosféricas en México, con énfasis en la climatología urbana. *Investigaciones Geográficas*. 114, e60845. doi: <https://doi.org/10.14350/rig.60845>
- Tejeda-Martínez, A., Balderas-Romero, G., Moreyra-González, L.E. y Castro-Díaz, J.O. (2024). Urban atmospheric humidity excesses and deficits in two Mexican metropolises: Guadalajara and Puebla. *Atmósfera*, 38: 187-216. doi: <https://doi.org/10.20937/ATM.53252>
- Tejeda-Martínez, A., Luyando-López, E., Méndez-Pérez, I.R. y Hernández-Parra, R.E. (2025). Evolución de la climatología urbana en México 1791-2024: islas de calor urbana y balance de energía. Consultar en este volumen.
- Toudert, D. (1996). Urban Linkages with Climate Intraregional and Study of Heat Islands in the City of Mexicali. *La Articulación Urbana con el Clima Intraregional y el Estudio de las Islas de Calor en la Ciudad de Mexicali*. *Revista Calafia*, 8, 29-35.
- Villanueva-Solís, J., Quiroa-Herrera, J. A. y González-Calderón, A. J. (2022). Vulnerabilidad climática urbana: isla de calor y marginación. El caso de Torreón, Coahuila. *Hatso Hnini Revista de Investigación de Paisaje y Espacio Construido*. 1(2). Recuperado de <https://n9.cl/iab26>
- WMO. (1986). Urban Climatology and its applications with special regard to tropical areas. Proceedings of the technical conference organized by the World Meteorological Organization and co-sponsored by the World Health Organization. México, D.F., 26-30 November 1984. WMO No. 652, Geneva, 534 p.
- WMO, (1970). Urban Climates. Technical Note No. 108, Volumen I. Geneva.

EFFECTO DEL CLIMA PARA EL TURISMO DE COSTA ESMERALDA, VERACRUZ MÉXICO.

Carlos Manuel WELSH-RODRIGUEZ¹, Dayra Sofía MENDOZA-CASAZZA² y
Jazmín RIVERA-BARRAGÁN³.

¹*Centro de Ciencias de la Tierra. Universidad Veracruzana. Circuito Gonzalo Aguirre Beltrán S/N. Edificio B Facultad de Instrumentación Electrónica. Col. Zona Universitaria. C.P. 91090. Xalapa, Ver. MX.*

²*Licenciatura en Ciencias Atmosféricas de la Facultad de Instrumentación Electrónica. Universidad Veracruzana. Circuito Gonzalo Aguirre Beltrán S/N. Col. Zona Universitaria. C.P. 91090. Xalapa, Ver. MX.*

³*Maestría en Economía Ambiental y Ecológica. Universidad Veracruzana. Facultad de Economía. Av. Xalapa S/N. Col. Obrero Campesino. C.P. 910200. Xalapa, Ver. MX.*

cwesh@uv.mx, zS21011284@estudiantes.uv.mx y jazrivera2804@gmail.com

RESUMEN

Para ONU Turismo, el turismo de sol y playa es un segmento esencial de la industria turística global, se enfoca en la búsqueda de recreación y entretenimiento en lugares con sol, mar y arena, incluye una variedad de actividades relacionadas con el mar y la playa, con alta demanda durante los meses estivales en el hemisferio norte. Es un mercado altamente influyente a nivel mundial. En el estado de Veracruz este sector impacta de manera positiva a su economía. Se desarrolló un estudio de caso, para la transferencia de conocimiento con el sector turismo ante las condiciones de cambio climático en el marco del proyecto CLIMAR -fortalecimiento de la investigación, innovación y transferencia de conocimientos sobre cambio climático y turismo en las instituciones de educación superior-

El proyecto local está dividido en tres fases, siendo esta la primera. Se realizó un análisis para condiciones actuales y para escenarios de cambio climático, se estudió la oferta-demanda del sector en función del costo de viaje para una aproximación económica y la huella de carbono, se presentan y discuten resultados de la fase uno.

Palabras clave: Turismo, clima, cambio climático, huella de carbono y oferta.

ABSTRACT

Sun and beach tourism is an essential segment of the global tourist industry according to United Nations Tourism, it focuses on finding recreation and entertainment in places with sun, sea and sand, includes a variety of activities related to the sea and beach, with high demand during the summer months in the northern hemisphere. It is a highly influential market worldwide. This sector has a positive impact on Veracruz state economy. A Case study developed for the transfer of knowledge with the tourism sector in the context of climate change conditions within the framework of the CLIMAR project -strengthening research, innovation and knowledge transfer on

climate change and tourism in higher education institutions. There are three phases on the local project, this being the first. The current climate conditions and climate change scenarios was analyzed, the supply-demand of the sector was studied in terms of travel costs for an economic approach and carbon footprint, and phase one results were presented and discussed.

Key words: Tourism, climate, climate change, carbon footprint and offer.

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene dos objetivos centrales, en primer lugar, evaluar las condiciones del clima presente y de cambio climático mediante el índice de confort térmico (ICT), dado que permite conocer el nivel de confort que el turista necesita para poder desarrollar de forma agradable la actividad turística, para la zona de Costa Esmeralda, Veracruz. En segundo lugar, evaluar de manera directa el impacto actual mediante la valoración de costo de viaje de la huella de carbono asociada a los traslados del turista a la zona de Costa Esmeralda en el estado de Veracruz, México. Se observa y explica la decisión del visitante para continuar disfrutando del turismo de sol y playa, esto con base a la aplicación del ICT para el clima presente, además se distingue un ligero cambio resultado de usar los escenarios de cambio climático. Por otro lado, se observa con detalle un análisis de la oferta en la región, el gasto promedio y la huella de carbono asociada a los visitantes que disfrutan de la oferta turística de Costa Esmeralda.

1.1. El estado de Veracruz y el turismo.

En México, el turismo aporta al PIB nacional un 8.5% (INEGI, 2024), esta contribución refleja la importancia de este sector para la economía mexicana, especialmente en las zonas turísticas costeras, ya que México cuenta con una diversidad de playas a lo largo de su territorio.

El estado de Veracruz, y en particular la zona de Costa Esmeralda destaca como un importante destino turístico, extendiéndose 50 kilómetros aproximadamente a lo largo del Golfo de México, en los municipios de Nautla, San Rafael y Tecolutla (Ayuntamiento de Tecolutla, 2022). Esta zona se caracteriza por sus extensas playas y una biodiversidad de la región tropical, además de una economía local sólida debido al turismo, pues la afluencia de visitantes genera empleo y fomenta el comercio (INEGI, 2022). En 2022, Veracruz contribuyó con un 6.1 % al PIB turístico nacional (SECTUR, 2022).

En 2018, de acuerdo con el Compendio Estadístico del Turismo en México, las playas de Veracruz se posicionaron como el octavo destino turístico de playa más visitado en México, subrayando su atractivo para los turistas nacionales e internacionales, Costa Esmeralda, situada en el estado de Veracruz y abarcando áreas costeras de varios municipios, se destaca dentro de este contexto (SECTUR, 2018).

Se espera que en las próximas décadas las temperaturas de la superficie del mar en el Caribe, el Golfo de México y el Pacífico mexicano aumenten entre 1 y 2°C, lo que incrementaría las olas de calor y las tormentas intensas. Asimismo, las temperaturas

mínimas se elevarían, resultando en menos días fríos, y aumentaría tanto la intensidad del viento como la precipitación de los ciclones tropicales (Ivanova, 2013).

1.2. Costa Esmeralda Veracruz

Las playas de Costa Esmeralda están ubicadas en la región central del estado de Veracruz y abarcan la franja costera de los municipios de Tecolutla, Nautla y San Rafael. Comprenden diversas localidades, entre ellas Tecolutla, Lázaro Cárdenas, La Guadalupe, Ricardo Flores Magón, La Vigueta, Playa Oriente, Monte Gordo, Casitas y Maracaibo. Esta zona costera se extiende por más de 50 km y su nombre "Costa Esmeralda" se debe a los tonos verde y azul característico de sus aguas (Ayuntamiento de Tecolutla, 2022). Esta región costera tiene una vocación turística, cuenta con playas casi vírgenes, humedales y ríos que permiten convivir con la naturaleza y contar con actividades diversas, desde paseos en lancha y descenso en río, hasta relajarse y disfrutar de una zona con oleaje calmado en una playa de arena suave. La oferta turística es igualmente variada, con una gastronomía centrada en mariscos frescos y diversas opciones de hospedaje (Ayuntamiento de Tecolutla, 2022).

Las playas de Tecolutla, con terreno generalmente plano y presencia de ligeras ondulaciones-dunas muy bajas-, son conocidas a nivel nacional como uno de los destinos más importantes del estado de Veracruz; son las playas más cercanas a la Ciudad de México, debido a que se ubican a 321 km de distancia con un trayecto de 2h y 40 minutos cruzando a través de la carretera México-Tuxpan, muy cerca de la zona arqueológica del Tajín. El municipio de Tecolutla, localizado en la región del Totonacapan, se encuentra ubicado en la zona norte-centro del estado de Veracruz, en las coordenadas 20° 15' y 20° 36' de latitud norte y los meridianos 97° 46' y 97° 13' de longitud oeste. Limita al norte con Papantla, al este con el Golfo de México, al sur con Martínez de la torre y al oeste con Gutiérrez Zamora y Papantla. Tiene una superficie de 741.31 km², cifra que representa un 0.65% total del Estado (Ayuntamiento de Tecolutla, 2022). Su clima es cálido húmedo y subhúmedo con una temperatura media anual de 24 a 26 ° C, presenta abundantes lluvias en verano; sin embargo, durante los meses de octubre a noviembre se presentan algunas precipitaciones puntuales asociadas al paso de los frentes fríos, entre los meses de diciembre a febrero hay algunas lluvias relacionadas a la influencia estacional y al paso de sistemas tropicales.

El 38.6% de la población económicamente activa en Tecolutla depende su economía de la actividad turística en la región, es la principal fuente económica de los habitantes, sus ingresos provienen de los servicios turísticos-hotelería, gastronomía, venta de artesanías, paseos en lancha, entre otros. Tecolutla cuenta con diversas actividades y eventos durante el año, aquí se mencionan algunos de relevancia nacional e internacional: Liberación de tortugas en los meses de mayo a noviembre, avistamiento de aves migratorias y el Festival *Costa Esmeralda Fest* realizado entre el 1 y 3 de septiembre, que en su última edición, en tres días de duración, tuvo una asistencia de 68 mil personas y una oferta local hotelera del 96% de ocupación, lo que beneficio a 16 de sus localidades y una derrama económica de más de 69 millones 224 mil pesos (Flores,2023).



Fig. 1: Costa Esmeralda, Ver. MEX. Fuente: Elaboración propia

1.3. Análisis económico en Costa Esmeralda

La regionalización turística en México está organizada en ocho macro regiones funcionales, con ellos se busca mejorar la planificación y promoción del turismo en distintas áreas del país, considerando sus características geográficas, culturales y económicas (SECTUR, 2022).

El análisis del PIB Turístico Municipal refleja la dependencia del turismo en la economía local, de acuerdo con la tabla 1, la composición del empleo en los tres municipios muestra una economía dominada por actividades primarias y terciarias, aunque con algunas variaciones notables. La participación del sector terciario (servicios) es relativamente equilibrada en todos los municipios, lo que podría indicar la importancia del comercio y los servicios relacionados con el turismo y la recreación.

Indicador/municipio		Nautla	Tecolutla	San Rafael
Distribución por sectores (2020)	Sector primario (agricultura, pesca)	46.70%	53.30%	41.30%
	Sector secundario (industria)	12.30%	7.80%	11.40%
	Sector terciario (servicios)	40%	38.60%	45.80%
Población Económicamente Activa ocupada		4,561	12,233	15,274

Tabla 1: Indicadores económicos y productivos municipales. Fuente: Elaboración propia con datos de Cuadernillos Municipales de Nautla, Tecolutla y San Rafael 2023, SEFIPLAN, 2023.

En 2022, la participación del PIB turístico en Nautla alcanzó el 61.48%, mientras que Tecolutla destacó por su fuerte dependencia del sector con una participación del

74.91%, a diferencia, San Rafael mostró una participación significativamente menor, ya que el turismo contribuyó con solo el 1.70% del PIB municipal, lo que refleja un impacto más limitado del sector turístico en su economía en comparación con los otros municipios. (SECTUR, 2022).

2. Turismo, clima y cambio climático.

México es un país que cuenta con una geografía privilegiada por la presencia de los océanos pacífico y atlántico, además de las muy afamadas playas del caribe mexicano, esto da como resultado una gran diversidad a lo largo del territorio nacional y se relaciona con la alta demanda de los destinos de sol y playa en los últimos años. El turismo contribuye con el 8.5 % del Producto Interno Bruto (PIB) nacional, donde el 45 % de esta actividad está orientada a zonas turísticas de sol y playa (Puente, 2023). La gran variedad de playas y paisajes naturales distribuidos a lo largo de México y en especial de Veracruz, donde se extiende a lo largo de 745 km y contiene una gran diversidad de ecosistemas como arrecifes coralinos, pastos marinos, dunas costeras, manglares y lagunas costeras (SECTUR, 2022). Factores naturales tales como el clima, la plataforma continental amplia, el oleaje en el golfo de México, humedales, ríos, estado de conservación de las playas, paisajes naturales, vestigios históricos y prehispánicos le dan valor a dicha actividad en Veracruz.

El sector turístico es susceptible a fenómenos climáticos globales e incide de manera negativa en algunos problemas relacionados con el medio ambiente, por la generación de residuos, huella de carbono, extracción de especies y hasta destrucción de hábitats. En el Sexto Informe de Evaluación (AR6, por sus siglas en inglés) realizado por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), se señala que se ha detectado que los sectores expuestos al clima tendrían daños económicos como consecuencia de cambios en las condiciones climatológicas globales (IPCC, 2023). El clima regional del golfo de México se va a modificar, los escenarios de cambio climático regionalizados para el estado de Veracruz están disponibles en el sitio web (<https://atlasclimatico.unam.mx/veracruz/>), se usaron las variables temperatura y precipitación, en los horizontes medio 2041-2060 y lejano 2081-2100, para el municipio de Tecolutla, Veracruz, México (Fernández-Eguiarte y Welsh-Rodríguez, 2024 en prensa).

3. MÉTODOS

3.1. HCI para Costa Esmeralda

El *HCI:beach* (*Holiday Climate Index*) (Rutty et al., 2020) se construyó a partir de una modificación del índice ICT de Mieczkowski (1985). La caracterización del modelo *HCI:beach* de aptitud climático-turística se realiza a escala diaria a partir de una serie disponible de 10 años de datos.

$$HCI:beach = 2(CT) + 4(Nb) + 3(Pr) + Vv \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

- CT representa el confort térmico en °C.
- Nb es la variable nubosidad en porcentaje.
- Pr es la precipitación total en mm.

- V_v es la velocidad del viento en km/h.

3.3 Huella de carbono

Para calcular las emisiones de CO_2 se necesita estimar la distancia promedio recorrida por los turistas a Costa Esmeralda, en su trayecto desde su lugar de origen, así como el promedio de emisiones por litro de gasolina consumido, estos insumos se obtienen indirectamente del método de costo de viaje (apartado 3.3.1). La estimación de las emisiones de CO_2 se obtiene a partir de la siguiente ecuación la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, 2024):

$$\text{Emisiones de } \text{CO}_2 = \text{Combustible (lt)} \times \text{Factor de emisión (kg } \text{CO}_2/\text{lt)} \quad (\text{Ec.2})$$

3.3.1 Costo de viaje insumo para estimar la huella y determinar preferencias

El método del costo de viaje es una técnica indirecta utilizada para estimar el valor económico de los servicios recreativos que ofrece el ambiente, especialmente cuando los individuos deben trasladarse para su disfrute. El costo de viaje proporciona una medida del valor económico de estos espacios, basada en la suma que los visitantes están dispuestos a pagar para acceder y disfrutar de ellos (Azqueta, 2007).

La relación inversa que estudia esta metodología es a menor costo incurrido, mayor número de viajes, para obtener esta relación, es a través de variables que explican los costos generados, de acuerdo con Moreno et al., (2015), se puede expresar en la siguiente función.

$$V_i = V(C_i, S_i, T_i) \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

- V_i es el número de visitas por visitante en un tiempo determinado.
- C_i es el costo de viaje.
- S_i es un vector de variables socioeconómicas.
- T_i es un vector que caracteriza el viaje.

Para calcular la variable de costo de viaje de acuerdo con Orrego et al., (2010) se obtiene de la siguiente función:

$$C_i = D [(\text{costo/km} + \{\%w(\text{ingreso-anual/hr-año})\}/V)] \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde D es la distancia en kilómetros de ida y vuelta al sitio, costo/km es el rendimiento costo del coche, % w es el costo de oportunidad del tiempo de viaje y V es la velocidad promedio de viaje, insumos necesarios para estimar la huella de carbono y comprender la preferencia del turista para volver.

4. RESULTADOS

4.1 HCI:beach

Los resultados obtenidos utilizando el *HCI:beach* se clasifican en una escala estándar de 5 categorías (muy desfavorable, desfavorable, bueno, muy bueno, óptimo), donde a los valores menores de 30 se les asigna como muy desfavorables y a los de entre 70 a 100 se les mencionan como óptimos (Millán,2023). Los datos se obtuvieron del Sistema Meteorológico Nacional dentro de la categoría de información estadística climatológica para la estación de Tecolutla, con código de 30171, y de *CERES*, un proyecto que proporciona observaciones satelitales de nubes. Se recopilaron, analizaron y organizaron los datos en dos periodos, de 1999 hasta el año 2008 y el segundo como 2009 al 2018.

Décadas	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1999-2008	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Muy desfavorable	Muy desfavorable	Muy desfavorable
2009-2018	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo

Categoría	Muy desfavorable	Desfavorable	Bueno	Muy bueno	Óptimo
-----------	------------------	--------------	-------	-----------	--------

Tabla 1: Confort para Costa Esmeralda, para las décadas de 1999-2008 y 2009-2018. Fuente: elaboración propia.

4.2 HCI:beach ante cambio climático

Los escenarios fueron construidos desde el proyecto de escenarios de cambio climático regionalizados para Veracruz, que tiene como base los datos del proyecto CORDEX (*Coordinated Regional Downscaling Experiment*), y los datos del sexto informe de evaluación (AR6) del IPCC (IPCC. 2023), para las variables: temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación para el horizonte lejano 2081-2100; con un escenario RCP8.5; período de referencia 1981-2010 y resolución temporal mensual para el dominio CORDEX Central América. Con una resolución espacial de 30" x 30" (<https://atlasclimatico.unam.mx/veracruz/>).

Escenario con un RCP 8.5 para un horizonte lejano de 2081-2100											
Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Muy desfavorable	Muy desfavorable	Muy desfavorable	Muy desfavorable	Muy desfavorable	Óptimo	Óptimo

Categorías				
Muy desfavorable	Desfavorable	Bueno	Muy bueno	Óptimo

Tabla 2: Confort para Costa Esmeralda, para el escenario lejano de 2081 a 2100 bajo un caso extremo con un RCP de 8.5. Fuente: elaboración propia

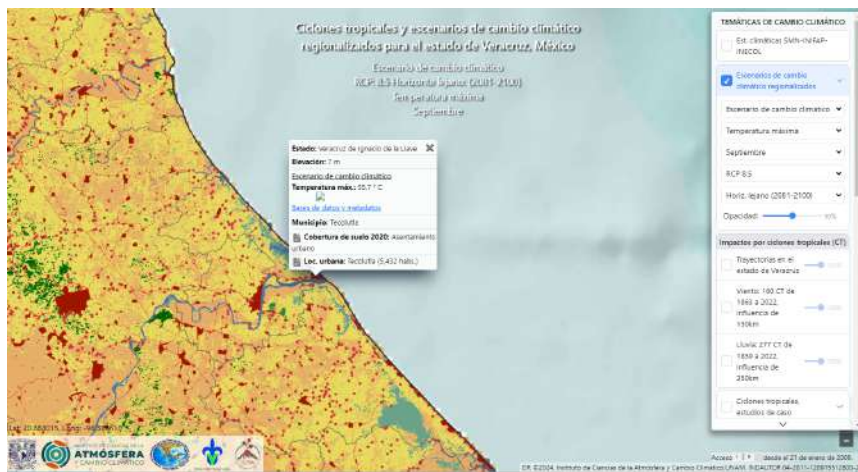


Fig. 2: Escenario de temperatura máxima para septiembre en Costa Esmeralda, Ver. Horizonte lejano 2081-2100. Fuente: Elaboración propia con datos del <https://atlasclimatico.unam.mx/veracruz/>

Es posible concluir a partir de los análisis que para condiciones de cambio climático y ante los escenarios de cambio climático el invierno y la primavera se volverán las temporadas idónea para disfrutar de Costa Esmeralda, dejando al verano en una descenso de dos categorías con respecto a la década de 1999-2008, por lo que la planeación de cara a prácticas de turismo sostenible y de conservación del patrimonio, junto con un trabajo armonizado con las comunidades locales será la mejor inversión para el crecimiento de la región.

4.3 Impactos económicos y huella de carbono

En promedio los turistas de Costa Esmeralda, Veracruz, viajan 598 km, para una estancia promedio de 3 días y dos noches, con un trayecto promedio de 4 a 5 horas. El costo promedio por litro de gasolina fue de \$24 pesos (1.11euros por litro), considerando dos opciones de rendimiento por coche entre 10km/l y 15km/l, da un gasto de \$1,435.20 pesos y \$956.88 pesos, respectivamente, representando un 12.81% y 19.21% del salario mínimo mensual en México.

En lo que se refiere a la huella de carbono, considerando un rendimiento estandarizado del coche de 10 km por litro, se estiman 138.14 kg de CO₂eq para la distancia promedio por vehículo, lo que representan para la temporada de marzo de 2024 un total aproximado de 48.35 toneladas de CO₂eq/persona/día para los visitantes.

5. COMENTARIOS FINALES

Cumplir con los objetivos del estudio permitieron articular de manera orgánica dos programas académicos, la licenciatura en Ciencias Atmosféricas y la Maestría en Economía Ambiental y Ecológica, ambos de la Universidad Veracruzana, con un proyecto Erasmus +, donde la Universidad está asociado, el trabajo interdisciplinar sirvió en la generación de discusiones, instrumentos y el desarrollo del constructo metodológico aplicado en conjunto, observando la posibilidad futura de replicarse

para sitios de mayor oferta turística en Veracruz, donde además del turismo de sol y playa, existe una creciente demanda de ecoturismo. Se observa como un área de oportunidad facilitar cursos sobre los efectos e impactos del cambio climático en la industria del turismo, particularmente para incrementar la oferta en meses de baja demanda. Por otro lado, fue relevante estimar el gasto promedio del turista en Costa Esmeralda y las áreas de mejora que se desprenden para los servicios presentes, sin embargo, llama poderosamente la atención los posibles efectos ante condiciones de cambio climático para la zona, esto sin lugar a dudas, debe ser un elemento necesario a incorporar para la planificación de la oferta en el área de turismo regional. Los turistas que visitan Costa Esmeralda, Veracruz, la mayoría realizan su viaje en coche, esto con el impacto en la huella de carbono, por lo el transporte es un factor determinante que influyen no solo en el presupuesto de los turistas, sino también en el calentamiento global. Por el tamaño del PIB y las actividades ligadas a la zona costera, es necesario contar con estudios locales y que sean ampliamente difundidos entre prestadores de servicios y la comunidad, para incrementar la calidad del servicio y buscar áreas de oportunidad ante el cambio climático.

AGRADECIMIENTOS

Es necesario agradecer al proyecto CLIMAR por permitir participar a la UV como miembro asociado al proyecto y contribuir con el presente estudio de caso. En segundo lugar, al programa de estancias semestrales de investigación de la Dirección General de Investigaciones UV por fomentar la participación en la investigación a estudiantes de pregrado, y finalmente a la Maestría en Economía Ambiental y Ecológica de la Facultad de Economía UV, por facilitar la investigación interdisciplinar, sin ellos el presente trabajo no hubiera sido posible.

REFERENCIAS

- Ayuntamiento de Tecolutla. (2022). Plan municipal de desarrollo 2022-2025. Recuperado de <https://www.veracruz.gob.mx/finanzas/wp-content/uploads/sites/2/2022/PMD/PMD%20Tecolutla.Veracruz.2022-2025..pdf>
- Azqueta, D. (2007). Introducción a la economía ambiental (2ª ed.). Madrid: McGraw-Hill/Interamericana de España, S. A. U.
- CERES_CldTypHist_Ed41A *Subsetting and Browsing*. (s. f.). <https://ceres-tool.larc.nasa.gov/ord-tool/jsp/CldTypHistEd41Selection.jsp>
- EPA. (2024). Greenhouse Gases Equivalencies Calculator - Calculations and References. Recuperado de <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gases-equivalencies-calculator-calculations-and-references>
- Flores, J. M. (2023, 6 septiembre). *Costa Esmeralda Fest 2023: Derrama económica refleja éxito del festival*. NotiPress. Recuperado 17 de octubre de 2024, de <https://notipress.mx/actualidad/costa-esmeralda-fest-2023-derrama-economica-refleja-exito-del-festival-16900>
- INEGI. (2024). Cuentas satélite del turismo en México. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/temas/turismosat/>

IPCC, 2023: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001

Ivanova, A. (2013). El turismo frente al cambio climático: adaptación y mitigación. En M. E. Sánchez Salazar (Coord.), *México frente al cambio climático. Retos y oportunidades* (pp. 239-260). Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades, UNAM. Recuperado de https://ru.ceiich.unam.mx/bitstream/123456789/3143/1/CambioClim_Cap9_El_turismo_frente_al_cambio_climatico.pdf

Moreno Moreno, L. R., López Torres, V. G., & Marín Vargas, M. E. (2015). Actividad turística y cambio climático en México, 1980-2012. *Revista Internacional Administración y Finanzas*, 8(4), 61-76. Recuperado de https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2660505

Mieczkowski, Z. (1985). *The tourism climatic index: a method of evaluating world climates for tourism*. *The Canadian Geographer/Le Géographe canadien*, 29(3), 220-233. doi:<http://dx.doi.org/10.1111/j.1541-0064.1985>.

Millán López, A. (2023). Climatología del Turismo Aplicada ante la dinámica de complementariedad litoral-interior: la provincia de Granada como base de estudio. *Cuadernos Geográficos*, 62(1), 150-170. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v62i1.24076>

Rutty, M., Scott, D., Matthews, L., Burrowes, R., Trotman, A., Mahon, R. y Charles, A. (2020). *An Inter-Comparison of the Holiday Climate Index (HCI:Beach) and the Tourism Climate Index (TCI) to Explain Canadian Tourism Arrivals to the Caribbean. Atmosphere*. 11 (4), 412. doi: <https://doi.org/10.3390/atmos11040412>.

Setchell, H. (1940, 1 enero). *ECMWF Reanalysis v5*. ECMWF. <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5>

SECTUR. (2018). Ranking por llegada de turistas sol y playa [Archivo CSV]. Recuperado de <https://www.sectur.gob.mx/wp-content/uploads/2018/10/19.Rankingporllegadadeturistassolyplaya111018.csv>

SECTUR. (2022). PIB Turístico Estatal y Municipal. Recuperado de <https://datatur.sectur.gob.mx/SitePages/PibTuristicoEstatalMunicipal.aspx>

SEFIPLAN. (2023). Cuadernillos Municipales de San Rafael, Tecolutla y Nautla Veracruz 2023. Gobierno del Estado de Veracruz. Recuperado de http://ceieg.veracruz.gob.mx/wp-content/uploads/sites/21/2023/08/San-Rafael.CM_Ver_2023.2.pdf, recuperado de http://ceieg.veracruz.gob.mx/wp-content/uploads/sites/21/2023/08/Tecolutla.CM_Ver_2023.2.pdf, recuperado de http://ceieg.veracruz.gob.mx/wp-content/uploads/sites/21/2023/08/Nautla.CM_Ver_2023.2.pdf

VALIDATION OF DIFFERENT CLIMATE REANALYSIS MODELS USING OBSERVATIONAL DATA AT SIX SITES IN MOROCCO

Younes ZEKEIK^{1*}, María José ORTIZ BEVIA¹ y Francisco José ALVAREZ-GARCIA¹

¹*Climate Physics Group, Department of Physics and Mathematics, University of Alcalá, Alcalá de Henares, Spain.*

younes.zekeik@edu.uah.es, mjose.ortiz@uah.es, franciscoj.alvarez@uah.es

RESUMEN

Los datos de viento reanalizados son valiosos para la planificación y la evaluación, especialmente cuando se carece de observaciones. Sin embargo, los productos de reanálisis de viento disponibles pueden diferir significativamente en algunas regiones donde los datos no están bien muestreados o donde los modelos utilizados no tienen habilidad predictiva, como es el caso de Marruecos. Este trabajo compara la variabilidad observada para los años 2015-2016 en seis lugares diferentes de Marruecos con la simulada por los datos de viento de los reanálisis ERA5-Land, JRA-55, MERRA-2 y NCEP/NCAR R1 en los mismos puntos y años. Se utilizan diferentes metodologías estadísticas lineales y no lineales para determinar la precisión y el potencial del reanálisis en esta región como alternativa o complemento a las observaciones realizadas in situ. Los resultados indican que, si bien el reanálisis representa de forma coherente las tendencias generales, las discrepancias varían según la localización geográfica y la estación del año. Los datos de viento de ERA5-Land obtienen los mejores resultados, mientras que los obtenidos por MERRA-2 se aproximan (con mejor rendimiento en las localizaciones del interior). El estudio subraya la importancia de la verificación local antes de utilizar el reanálisis en aplicaciones prácticas como la modelización climática o la planificación de recursos.

Palabras clave: Datos de reanálisis, Distribución de Weibull, Variabilidad interanual, Vacilaciones del viento.

ABSTRACT

Reanalysed wind data are valuable for planning and assessment, especially when wind observations are lacking. However, the available wind reanalysis products may differ significantly in some regions where the data are not well sampled or where the models used do not have predictive skills, which is the case of Morocco. This paper compares the observed variability for 2015-2016 at six locations in Morocco with the variability simulated by ERA5-Land, JRA-55, MERRA-2 and NCEP/NCAR R1 reanalysis wind data at the exact locations and years. Different linear and nonlinear statistical methodologies are used to determine the accuracy and potential of reanalysis at this region as an alternative or complement to observations made in situ. The results indicate that while reanalysis consistently represents overall trends, discrepancies vary by geographic location and season. The results of the ERA5-Land wind data

stand out, while those achieved by MERRA-2 are close (with better performance at inland locations). The study highlights the importance of local verification before using reanalysis in practical applications such as climate modelling or resource planning.

Keywords: Reanalysis data, Weibull distribution, Interannual variability, Wind vacillations.

1. INTRODUCTION

The climate of Morocco varies between semi-arid and arid, with complex spatial and temporal variations resulting from the diversity of the region's geography, influenced by both the Mediterranean Sea and the Atlantic Ocean. Winds play a crucial role in this climate system, with diverse air currents such as the regular trade winds on the Atlantic coasts and the warm Saharan winds known as "chergui". Inland, the winds are more turbulent and variable due to the Atlas Mountains' presence, further complicating wind behaviour. These conditions generate significant differences between coastal and inland areas and the country's northern and southern regions. Given the scarcity of in situ climate data in Morocco, climate reanalysis datasets constitute an essential complement by providing continuous records of meteorological variables using advanced numerical models. Among these datasets, ERA5, IFREMER, and ASCAT wind data have been successfully used in long-term assessments of wind potential in Morocco's marine and coastal areas (Zekeik et al., 2023; Benazzouz et al., 2021). However, reanalysis processes face significant challenges in areas of complex terrain, such as the Atlas Mountains, where the spatial resolution of models may not be sufficient to capture local wind characteristics accurately. Therefore, validating these data against local observations from ground-based meteorological stations is essential to assess their accuracy and applicability in Morocco. Improving the understanding of wind behaviour in Morocco by integrating reanalysis data and local observations is necessary for weather forecasting, energy resource management, and sustainable planning. This is particularly important for developing wind energy projects, water resource management, and agricultural planning, as well as contributing to climate change mitigation and promoting renewable energy use in the country.

2. DATA AND METHODS

2.1. Data Sets

2.1.a. Observed Wind Data

For the first site, Alkoudia-Albaida (AA), 10 min wind observations from 2016 from a wind farm mast are available 50 m and 80 m above the ground. For the second site, Dakhla (DK), the 1-hour observations were made with a meteorological station recording at two different heights, 50 m and 75 m, a device considered equivalent to the one used in mast observations. The estimated instrumental error of these measurements was ± 0.5 m/s. At the four remaining locations, 1-hour wind

observations recorded at 10 m height by meteorological stations, retrieved from the Hadley Centre's Integrated Surface Database (HadISD) version 3.1.0.2019f (2020), were used. These data were quality-controlled to remove insufficient data and to keep the extremes (Dunn, 2019). Figure 1. a shows the positioning of the selected sites.

2.1.b. Reanalysed Wind Datasets

Four advanced, widely recognised global reanalyses were used in this study: ERA5-Land from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) (Copernicus Climate Change Service (C3S), 2019); the Japanese 55-year reanalysis (JRA-55), from the Japan Meteorological Agency (JMA) (Kobayashi et al., 2015), the Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2), from NASA (Gelaro et al., 2017), and the National Center for Environmental Prediction and National Center for Atmospheric Research Reanalysis (NCEP/NCAR R1) (Kalnay et al., 1996). These reanalyses were based on a comprehensive exploratory analysis, where other alternatives were also considered, including earlier versions of some datasets, such as JRA-25 (Onogi et al., 2007), ERA40 (Uppala et al., 2005), ERA-Interim (Dee et al., 2011) and MERRA (Molod et al., 2015). However, only NCEP/NCAR R1 was chosen over its more recent version, NCEP/DOE R2 (Kanamitsu et al., 2002), due to its superior performance in simulating the wind field in the study area.

The exploratory analysis also included regional reanalyses with higher spatial resolution, such as UERRA-HARMONIE (Ridal et al., 2017) and UERRA-MESCAN-SURFEX (Pelosi et al., 2020). These regional reanalyses generally improve global reanalyses obtained through dynamic downscaling and data assimilation techniques (Mesinger et al., 2006; Gleeson et al., 2017). However, since the performance of regional reanalyses depends mainly on the quality of the global products on which they are based (Ramon et al., 2019), it was decided to focus the analysis at this stage exclusively on global reanalyses, leaving the evaluation of regional wind energy simulations for future research.

2.2. Validation Methodologies

The first validation method of the wind reanalysis consisted of estimating basic statistical parameters, namely the Pearson correlation coefficient (CC) (Ranadip, 2017), the root mean square error (RMSE), the mean bias error (MBE), the standard deviation of the error (STDE), the coefficient of variance (C_v), and the coefficient of determination (R^2 , given by one minus the ratio of the residual to the total sum of squares, as, for instance, in (Stetco et al., 2019).

The second validation method is based on fitting a statistical distribution to the observed and the reanalysed wind data and comparing the distribution parameters in each case. This method does not require the linearity hypothesis. Several statistical distributions have been applied to the study of the wind resource. Among them, the two parameters of Weibull distribution are the most frequently used for characterising wind speed at a specific location over a specified period (Carta et al., 2009). The Weibull probability density function is written as:

$$f(v) = \left(\frac{k}{c^*}\right) \left(\frac{v}{k}\right)^{k-1} \exp \left[-\left(\frac{v}{c^*}\right)^k \right] \quad (1)$$

The c^* (scale parameter, in m/s) is mainly proportional to the mean value of the wind speed, while the dimensionless coefficient k (shape parameter) is linked to the standard deviation.

Various methods for estimating the shape and scale parameters of the Weibull distribution are available in the literature, including the least square regression method, the non-iterative method, the method of moments, and the maximum likelihood method.

Among the methods mentioned, we chose to use the one-of-moment shape in this study because it is based on the average real daily wind speed and its daily standard deviation (Chauhan et al., 2014). The daily shape and scale parameters of the Weibull distribution function were calculated using:

$$c^* = \frac{\bar{v}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} [m/s] \quad (2. a)$$

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}}\right)^{-1.086} \quad (2. b)$$

Here, \bar{v} and σ denote the time series' mean and standard deviation.

To validate the wind direction, its distribution was divided into sixteen segments of equal width, each with an extension of 22.5° , one for instance being North (N), followed by North-North-East (NNE), North-East (NE), East-North-East (ENE), East (E), East-South-East (ESE), South-East (SE), South-South-East (SSE), South (S) and so on. Thus, the frequencies of the wind direction distribution were calculated according to the following equation:

$$f_j = \frac{c_j}{\sum_1^j c_j} \quad (3)$$

where j is the index of the sector compass, c_j is the wind speed value assigned to sector j , and f_j is the occurrence frequency of the j directional wind.

3. RESULTS

3.1. Linear Validation

Figure 1 shows the difference in wind speed estimates at 10 m height between the Morocco region's four reanalyses (ERA5-Land, JRA-55, MERRA-2 and NCEP/NCAR-R1). JRA-55 and MERRA-2 have higher wind speeds (6-8 m/s) and a more homogeneous distribution, especially in the Atlantic coastal regions, which may reflect a higher sensitivity to large-scale synoptic phenomena or that these reanalyses tend to underestimate stronger winds compared to other winds. On the other hand, ERA5-Land and NCEP/NCAR-R1 show lower wind speeds, with more significant variation between coastal and continental regions, better capturing the influence of local topography. These differences underscore the importance of considering

multiple reanalyses to obtain a complete picture of wind behaviour in long-term climate studies of the region.

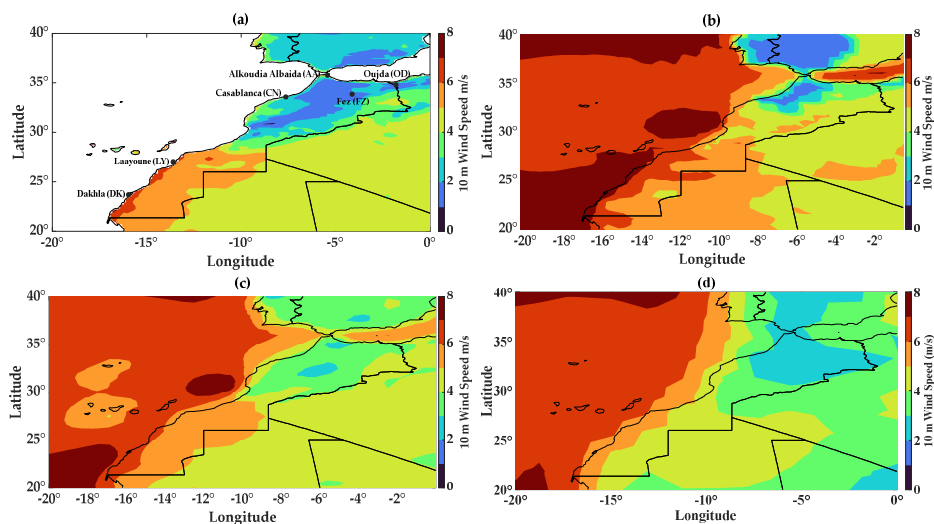


Fig. 1: Mean wind speed of the reanalysis wind data at 10 m height (m/s) for the validation period (2015–2016). (a) ERA5-Land data, (b) JRA-55 data, (c) MERRA-2 data and (d) NCEP/NCAR R1 data.

The previous figure compares statistical estimates of the mean, standard deviation, mean squared coefficient, and marginal standard deviation of each reanalysed wind field with the observations performed here. From this comparison, the winds produced by ERA5-Land and MERRA-2 appeared to have lower errors in the mean, standard deviation, marginal standard deviation, and marginal standard deviation. They also recorded higher R^2 correlations and CC correlation coefficients, which measure the degree of linearity between these two data sets. These results reflect that the winds simulated by ERA5-Land and MERRA-2 were in better agreement with the observed data. For example, wind speeds at 10 m altitude were significant at three of the studied sites but more critical at the southern site (DK), where the observation mean value of 6.86 m/s was well captured by the corresponding ERA5-Land mean value of 6.82 m/s. Similarly, at the northern position (AA), the mean value of 5.17 m/s derived from observations is equivalent to 4.99 m/s in ERA5-Land. Conversely, at the inland sites (OD and FZ), MERRA-2 outperforms ERA5-Land. Compared to ERA5-Land, MERRA-2, NCAR/NCEP R1, and JRA-55, winds recorded lower correlation values at all selected sites.

3.2. Non-linear Validation

Furthermore, as mentioned in the methodology, a second validation was performed based on comparing the modelled CDF and PDF and the Weibull PDF estimates from different wind speed datasets at the studied sites. From Figure 2, it appears that at the

wind farm sites (AA and DK), the ERA5-Land and MERRA-2 wind data were closer to the Weibull CDF obtained from the real-time data than the other reanalysis wind data, with an advantage for ERA5-Land. At the inland sites (OD and FZ), the MERRA-2 wind performance was better at the station (CN); similarly, only at the station (LY) did neither of the reanalysed CDFs closely approach the observed CDF. This relatively weaker performance of NCEP/NCAR R1 and JRA-55 can be explained by their coarse spatial resolution (1° latitude \times 1° longitude), which means a greater distance for the studied stations to the nearest grid point. The parameters c^* and k were also calculated from the Weibull PDF, their confidence intervals at the 95% significance level and their variances, and we concluded that ERA5-Land gives the best estimate of c^* at sites AA and DK. From the significant value of the shape parameter k at DK, it can be inferred that the winds at site DK were very regular and uniform. In contrast, the smaller values of k at site AA indicated winds that were variable in speed and stability. At the inland sites (OD and FZ), the parameter estimates of MERRA-2 were closer to the observations than those of ERA5-Land. The relatively poor performance of the reanalysed winds at LY can be linked to their failure to capture some significant outliers in the observations. The observed variability at the four northern sites was overestimated.

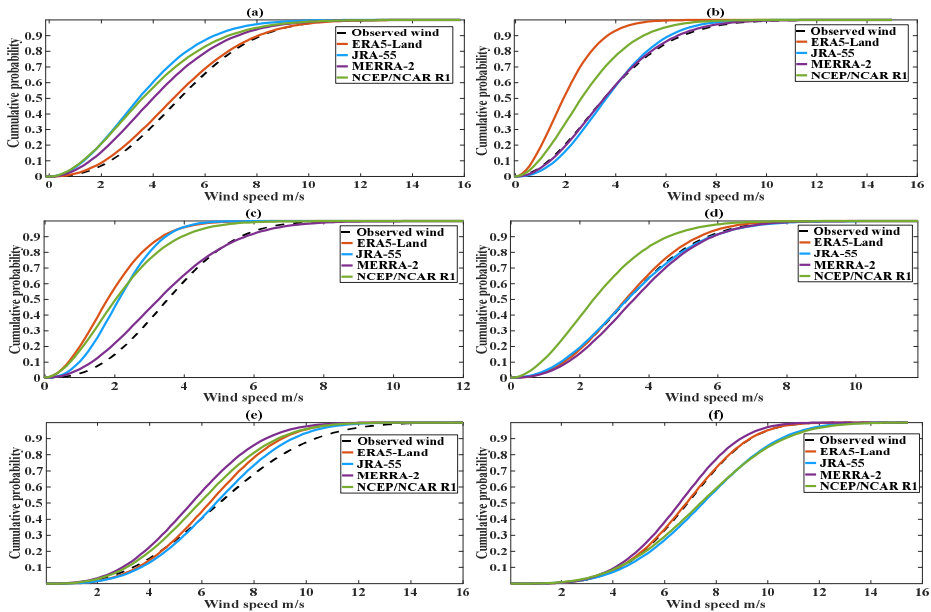


Fig. 2: Comparison of the cumulative wind speed distribution function (CDF) for the six locations. (a) Alkoudia Albaida, (b) Oujda, (c) Fez, (d) Casablanca, (e) Laayoune, (f) Dakhla.

3.3. Wind Direction Validation

The directional wind frequency analysis was included to obtain more quantitative results and validate the wind direction, as described in the Methodology section. Regarding the observed wind characteristics, the results of Figure 3 show that the

winds are bimodal in (AA), while in (DK), the dominant directions were N, NNE and NE. The directional wind frequency in (LY) was similar to that in (DK). In contrast, the prevailing winds at the inland station (OD) shift from S to NNW, while in (FZ), the winds with an easterly component were less frequent. Finally, in the case of CN, the prevailing winds have a northerly component, as was the case in (DK) or (LY), but the frequency of the winds with a southerly component is not negligible. To validate the directional wind frequency, it can be estimated that the band representing the ERA5-Land reanalysis estimate was closest to one of the observations at almost all stations.

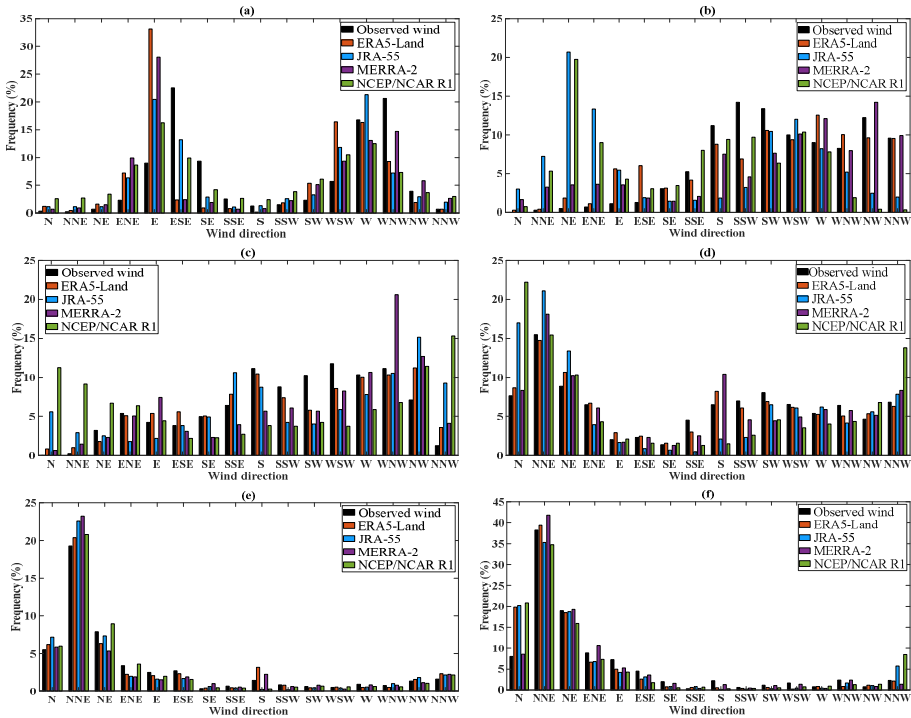


Fig. 3: Directional wind frequency obtained from observations (black), ERA5-Land (orange), JRA-55 (blue), MERRA2 (violet), NCEP/NCAR-R1 (green) for (a) Alkoudia Albaida, (b) Oujda, (c) Fez, (d) Casablanca, (e) Laayoune, (f) Dakhla. The year represented was 2016 at stations AA, OD, FZ, and CN, and 2015 at LY and DK.

3.4. Interannual Variability Validation

The monthly wind speeds at 10 m height obtained from observations were represented against those obtained from the reanalysis of wind data at the study sites (Figure 1). There was an essential consistency in the seasonal evolution of the winds at the AA site, with wind speeds ranging from 4.02 m/s to 6.33 m/s. Symmetries can also be estimated for the CN and LY cases. The seasonal variation was slight at the OD and FZ sites (approximately 3–4 m/s). This was not the case at DK, where wind speeds

ranged from 4.56 m/s to 7.80 m/s. Differences in the behaviour of wind direction and speed between north and south were also found, as noted in previous studies (Knidiri et al., 1986; El Khchine et al., 2021). According to the classification proposed by the National Renewable Energy Laboratory (NREL), locations with wind speeds greater than 5 m/s at 10 m height are suitable for commercial-scale energy production (Bianchi et al., 2006). In the present study, both sites (AA and DK) had the advantage of average wind speeds exceeding the stated value, effectively giving them the potential for large-scale wind energy production. The average seasonal cycle obtained from five years of ERA5-Land reanalysis (including the year used for validation) at each of the selected stations is also represented in Figure 4. A comparison with the observed and reanalysed monthly values allows for a better understanding of the previous results. The ERA5-Land reanalysed winds outperformed the others at AA, LY and DK, and their performance at CN was similar. At the inland stations (OD and FZ), a gap can be observed between the monthly ERA5-Land estimates and the monthly observations and between the average ERA5-Land values and the latter, which could not be found in the case of the other reanalyses and highlights the relatively weaker performance of the ERA5-Land reanalysis in estimating wind speeds at those locations. This fact did not affect our results because the low average wind values at the two inland sites and other wind characteristics did not indicate these locations as the most promising locations for wind park construction.

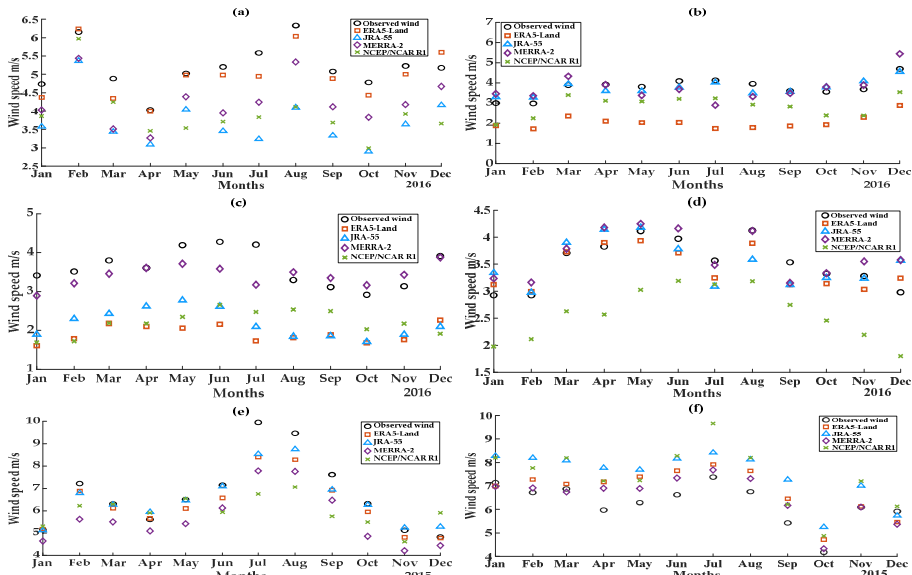


Fig. 4: Monthly wind values from observations (black circles), ERA5-Land (orange square), JRA-55 (blue triangle), MERRA-2 (violet diamond), NCEP/NCAR-R1 (green square) for (a) Alkoudia Albaida, (b) Oujda, (c) Fez, (d) Casablanca, (e) Laayoune, (f) Dakhla.

CONCLUSIONS

The time series corresponding to the six sites analysed in the reanalysis datasets were identified and validated against 10-m wind values obtained from mast observations and supplemented with 10-m meteorological wind data through linear and non-linear methodologies. The results of this study reveal that the wind fields re-analysed by ERA5-Land and MERRA-2 offer high spatial and temporal resolution, as evidenced by the parameters estimated from linear statistical validation techniques (RMSE, MBE, bias and R-squared (R^2)) as well as by non-linear probability density functions (PDF).

In particular, at site AA, the parameters determined from ERA5-Land are closer to those obtained from observations than the corresponding values of MERRA-2. This discrepancy is attributed to ERA5-Land's superior ability to resolve terrain complexity, which is critical in areas with variable topographic characteristics. At the DK site, the performance of the MERRA-2 reanalysis was similar to that of ERA5-Land, suggesting that MERRA-2 may provide competitive results under certain conditions.

At inland sites (OD and FZ), MERRA-2 and JRA-55 showed superior performance compared to ERA5-Land, indicating that the choice of reanalysis dataset can significantly affect the estimation of wind potential based on geographic location and characteristics from the terrain. The first three wind reanalyses provided similar results at the remaining sites (CN and LY), reinforcing the consistency of the data.

Regarding wind speeds at 10 m, the northern site (AA) showed mean values close to 5 m/s, with a dominant direction that varies seasonally from predominantly easterly to westerly. In contrast, the southern site (DK) recorded an average speed greater than 6.5 m/s, with northern wind directions dominating. While these values support the wind potential of both sites, they emphasise the suitability of the southern site for renewable energy development. The other southern site (LY), included in the validation, presented average values and wind potential similar to DK. Finally, sites OD and FZ showed average wind speeds below 4 m/s, indicating limitations on their suitability for wind projects.

In conclusion, this study contributes to a better understanding of wind dynamics in Morocco and provides essential information for the region's planning and development of wind energy projects. Validating reanalysis data against local observations is a crucial step to improving the management of energy resources and mitigating the challenges associated with climate change.

ACKNOWLEDGEMENTS

The author thanks the European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), Japan Meteorological Agency (JMA), National Center for Environmental Forecasting (NCEP)/National Center for Weather Forecast and Atmospheric Research (NCAR) for producing, making available and making use of data sets on a large scale. The Met Office Hadley Centre: National Centers for Environmental Information – NOAA are acknowledged for the HadISD dataset. Prof. A RuizdeElvira and Prof. JC Nieto-Borge are acknowledged for sharing their computer resources with us for this study. The Compagnie Eolienne du Detroit (CED)-Tangier and Prof. Youness El

Mourabit are recognised for providing the raw wind data. Additionally, A RuizdeElvira is thanked for their helpful comments.

REFERENCES

- Benazzouz, A.; Mabchour, H.; El Had, K.; Zourarah, B.; Mordane, S. Offshore Wind Energy Resource in the Kingdom of Morocco: Assessment of the Seasonal Potential Variability Based on Satellite Data. *J. Mar. Sci. Eng.* 2021, 9, 31. <https://doi.org/10.3390/jmse9010031>.
- Bianchi, F.D.; Mantz, R.J.; De Battista, H. *Wind Turbine Control Systems: Principles, Modelling and Gain Scheduling Design*; Springer Science & Business Media: London, UK, 2006.
- Carta, J.A.; Ramírez, P.; Velázquez, S. A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis: Base studies in the Canary Islands. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2009, 13, 933-955. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.05.005>.
- Chauhan, A.; Saini, R.P. Statistical analysis of wind speed data using Weibull distribution parameters. In *Proceedings of the 2014 1st International Conference on Non-Conventional Energy (ICONCE 2014)*, 2014, pp. 160-163. <https://doi.org/10.1109/ICONCE.2014.6808712>.
- Copernicus Climate Change Service (C3S). C3S ERA5-Land reanalysis. Copernic Clim. Change Serv. 2019. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>. (Accessed 23 July 2023).
- Dee, D.P.; et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2011, 137, 553-597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>.
- Dunn, R.J.H. Hadisd v3: Monthly updates. Hadley Centre Tech. Note 2019, 103.
- El Khchine, Y.; Sriti, M. Performance evaluation of wind turbines for energy production in Morocco's coastal regions. *Results Eng.* 2021, 10, 100215. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100215>.
- Gelaro, R.; McCarty, W.; Suárez, M.J.; Todling, R.; Molod, A.; Takacs, L.; Randles, C.A.; Darmenov, A.; Bosilovich, M.G.; Reichle, R.; Wargan, K.; Coy, L.; Cullather, R.; Draper, C.; Akella, S.; Buchard, V.; Conaty, A.; da Silva, A.M.; Gu, W.; Kim, G.-K.; Koster, R.; Lucchesi, R.; Merkova, D.; Nielsen, J.E.; Partyka, G.; Pawson, S.; Putman, W.; Rienecker, M.; Schubert, S.D.; Sienkiewicz, M.; Zhao, B. The Modern-Era retrospective analysis for research and Applications, version 2 (MERRA-2). *J. Clim.* 2017, 30, 5419-5454. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>.
- Gleeson, E.; Whelan, E.; Hanley, J. Met Éireann high resolution reanalysis for Ireland. *Adv. Sci. Res.* 2017, 14, 49-61. <https://doi.org/10.5194/asr-14-49-2017>.
- Kanamitsu, M.; Ebisuzaki, W.; Woollen, J.; Yang, S.; Hnilo, J.J.; Fiorino, M.; Potter, G.L. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2002, 83, 1631-1644. <https://doi.org/10.1175/BAMS-83-11-1631>.
- Kalnay, E.; Kanamitsu, M.; Kistler, R.; Collins, W.; Deaven, D.; Gandin, L.; Iredell, M.; Saha, S.; White, G.; Woollen, J.; Zhu, Y.; Chelliah, M.; Ebisuzaki, W.; Higgins, W.; Janowiak, J.; Mo, K.C.; Ropelewski, C.; Wang, J.; Leetmaa, A.; Reynolds, R.; Jenne, R.; Joseph, D. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 1996, 77, 437-470. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437>2.0.CO;2).

- Kistler, R.; Kalnay, E.; Collins, W.; Saha, S.; White, G.; Woollen, J.; Chelliah, M.; Ebisuzaki, W.; Kanamitsu, M.; Kousky, V.; Van den Dool, H.; Jenne, R.; Fiorino, M. The NCEP–NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and Documentation. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2001, 82, 247-268. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2001\)082<0247>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2001)082<0247>2.3.CO;2).
- Kobayashi, S.; Ota, Y.; Harada, Y.; Ebita, A.; Moriya, M.; Onoda, H.; Onogi, K.; Kamahori, H.; Kobayashi, C.; Endo, H.; Miyaoka, K.; Takahashi, K. The JRA-55 Reanalysis: General specification and basic characteristics. *J. Meteorol. Soc. Jpn.* 2015, 93, 5-48. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2015-001>.
- Knidiri, F.; Laaouina, A. L'énergie éolienne au Maroc: analyse préliminaire basée sur les données existantes, 1986, CDER. www.cder.org.ma.
- Mesinger, F.; DiMego, G.; Kalnay, E.; Mitchell, K.; Shafran, P.C.; Ebisuzaki, W.; Jović, D.; Woollen, J.; Rogers, E.; Berbery, E.H.; Ek, M.B.; Fan, Y.; Grumbine, R.; Higgins, W.; Li, H.; Lin, Y.; Manikin, G.; Parrish, D.; Shi, W. North American Regional Reanalysis. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2006, 87, 343-360. <https://doi.org/10.1175/BAMS-87-3-343>.
- Met Office Hadley Centre & National Centers for Environmental Information - NOAA. (2020). HadISD: Global sub-daily, surface meteorological station data, 1931-2019, v3.1.0.2019f. Centre for Environmental Data Analysis. <https://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/e488dccd09e1446d90978b75036475e2> (Accessed 29 April 2023).
- Molod, A. et al. Development of the GEOS-5 atmospheric general circulation model: Evolution from MERRA to MERRA2. *Geosci. Model Dev.* 2015, 8, 1339-1356. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1339-2015>.
- National Renewable Energy Laboratory (NREL). Home Page | NREL, n.d. <https://www.nrel.gov/> (Accessed 20 November 2023).
- Onogi, K. et al. The JRA-25 reanalysis. *J. Meteor. Soc. Jpn.* 2007, 85, 369-432. <https://doi.org/10.2151/jmsj.85.369>.
- Pelosi, A.; Terribile, F.; D'Urso, G.; Chirico, G.B. Comparison of ERA5-Land and UERRA MESCAN-SURFEX Reanalysis Data with Spatially Interpolated Weather Observations for the Regional Assessment of Reference Evapotranspiration. *Water* 2020, 12, 1669. <https://doi.org/10.3390/w12061669>.
- Ranadip, P. Chapter 4 - Validation methodologies. In *Predictive Modeling of Drug Sensitivity*; Pal, R., Ed.; Academic Press: 2017; pp. 83-107. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805274-7.00004-X>.
- Ramon, J.; Lledó, L.; Torralba, V.; Soret, A.; Doblas-Reyes, F.J. What global reanalysis best represents near-surface winds? *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2019, 145, 3236-3251. <https://doi.org/10.1002/qj.3616>.
- Ridal, M.; Olsson, E.; Unden, P.; Zimmermann, K.; Ohlsson, A. Uncertainties in Ensembles of Regional Re-Analyses - Deliverable D2.7 HARMONIE reanalysis report of results and dataset (2017).
- Stetco, A.; Dinmohammadi, F.; Zhao, X.; Robu, V.; Flynn, D.; Barnes, M.; Keane, J.; Nenadic, G. Machine learning methods for wind turbine condition monitoring: A review. *Renew. Energy* 2019, 133, 620-635. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.047>.
- Uppala, S. M., et al. (2005). The ERA-40 re-analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131(613), 2961-3012. <https://doi.org/10.1256/qj.04.176>.

Zekeik, Y., Ortiz-Bevia, M. J., Alvarez-Garcia, F. J., Haddi, A., El Mourabit, Y., & Ruiz-de-Elvira, A. (2024). Long-Term Assessment of Morocco's Offshore Wind Energy Potential Using ERA5 and IFREMER Wind Data. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(3), 460. <https://doi.org/10.3390/jmse12030460>.