

ANÁLISIS DE LA ENERGÍA EÓLICA Y LA DEMANDA ENERGÉTICA EN CONDICIONES ACTUALES DE OLA DE CALOR EN EL SUR DE EUROPA

María Ofelia MOLINA SÁNCHEZ¹, Claudia GUTIÉRREZ ESCRIBANO², María ORTEGA CAMACHO¹ and Enrique SÁNCHEZ SÁNCHEZ³

¹*Instituto de Ciencias Ambientales. Universidad de Castilla-La Mancha.*

²*Departamento de Física y Matemáticas. Universidad de Alcalá.*

³*Facultad de Ciencias Ambientales y Bioquímica. Universidad de Castilla-La Mancha.*

MOfelia.Molina@uclm.es, Claudia.gutierrez@uah.es, María.Ortega@uclm.es
e.sanchez@uclm.es

RESUMEN

Las energías renovables están ganando importancia en el mix energético, aumentando la dependencia del sistema energético del clima. En Europa, los estudios se han centrado en los patrones atmosféricos relacionados con la producción de energía eólica en invierno, ya que el recurso eólico es mayor, y la demanda para calefacción es mayor y más estable. Se ha prestado menos atención a la producción eólica en verano, cuando la demanda de energía puede ser igualmente elevada para refrigeración en el sur del continente debido a las altas temperaturas. En verano los valores de viento son habitualmente más bajos, por lo que un aumento potencial en la demanda de energía durante una ola de calor podría comprometer el suministro total de energía eólica. En este trabajo se han analizado las condiciones combinadas de viento, demanda energética y patrones atmosféricos durante el verano (1989-2019) en el sur de Europa para estudiar el riesgo de que se puedan dar esas circunstancias. Para ello, se ha empleado el viento a 100 m del reanálisis ERA5 para calcular un modelo de producción eólica, así como el geopotencial en 500 hPa para calcular los principales patrones atmosféricos de verano. Las temperaturas máximas se han extraído de las observaciones en malla E-OBS, y la demanda energética del servicio climático europeo Copernicus. Los resultados indican relaciones claras entre aumento de demanda, descenso en la producción eólica y condiciones de ola de calor, con una importante variabilidad en función de los diferentes patrones atmosféricos y países analizados. Por tanto, el impacto de las olas de calor sobre la energía eólica en condiciones de alta demanda energética en el sur de Europa debe considerarse en la gestión del suministro energético para minimizar su impacto en un sistema eléctrico con alta penetración de renovables.

Palabras clave: energía eólica, olas de calor, demanda, patrones atmosféricos.

ABSTRACT

Renewable energies are gaining importance in the energy mix, increasing the dependence of the energy system on the climate. In Europe, studies have focused on atmospheric patterns related to wind energy production in winter, since the wind

resource is greater, and the demand for heating is greater and more stable in Europe. Less attention has been paid to wind production in summer, when energy demand can be equally high for cooling in the south of the continent due to high temperatures. In summer, wind values are typically lower, so a potential increase in energy demand during a heat wave could compromise the total supply of wind energy. In this work, the combined conditions of wind power, energy demand and atmospheric patterns during the summer (1989-2019) in southern Europe have been analyzed to study the risk that these circumstances occur. For this, the wind at 100 m from the ERA5 reanalysis has been used to calculate a wind production model, as well as the geopotential at 500 hPa to calculate the main summer atmospheric patterns. The maximum temperatures have been extracted from the E-OBS observational mesh database, and the energy demand from the European climate service Copernicus. The results indicate clear relationships between increased demand, decreased wind energy production and heat wave conditions, with significant variability depending on the different atmospheric patterns and countries analyzed. Therefore, the impact of heat waves on wind power in conditions of high energy demand in southern Europe must be considered in the management of energy supply to minimize its impact on an electrical system with a high penetration of renewables.

Key words: wind energy, heat waves, demand, weather regimes.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se está produciendo una transición del modelo energético Europeo hacia un incremento de las energías renovables en el mix energético. Esto hace que la generación dependa cada vez más de factores meteorológicos, como el viento o la irradiación, y su variabilidad, ya que las energías renovables dependen fundamentalmente de las condiciones meteorológicas.

La variabilidad de la energía eólica está relacionada con la velocidad y dirección del viento (Jerez, 2013). Ciclos anuales y diarios de viento caracterizan la variabilidad estacional en Europa, con más producción en invierno que en verano (Molina, 2021), y horas de sol más ventosas que las nocturnas. La relación entre la energía eólica y las condiciones de presión a gran escala en escalas de varios días se puede analizar mediante la metodología de "weather regimes" (WR) (Grams, 2017c). La idea principal de este método es inspeccionar las condiciones atmosféricas de presión sinóptica que duran varios días (5 - 7) para cada condición de campo de viento, con el objetivo de agruparlos y así clasificarlos en un pequeño número de condiciones sinópticas que pueden explicar la mayoría de los diferentes patrones de viento obtenidos. Trabajos previos (principalmente sobre la región del Atlántico norte de Europa, (Grams, 2017c Van der Wiel, 2019a, Van der Wiel 2019b, Bloomfield, 2020)) ya han estudiado los WR que afectan la producción de energía eólica. Muestran que una menor generación en invierno está relacionada con

patrones de bloqueo atmosférico, y una mayor generación está relacionada con regímenes ciclónicos. La mayoría de estos estudios se centran en los meses de invierno, con condiciones atmosféricas de producción de energía eólica más altas y persistentes, junto con una demanda de energía más alta y más estable (para calefacción) en Europa (Staffell, 2018).

Algunos estudios han analizado los WR de verano (Cassou, 2005), sin embargo, presentan una menor persistencia en comparación con los de la estación de invierno (Mukougawa, 1999). Los WR de verano no se han estudiado en relación con la producción de energía eólica, sino con la frecuencia de los extremos cálidos en Europa (Alvarez-Castro, 2018, Sanchez-Benitez, 2020). Los eventos de calor extremo en verano son más frecuentes durante los WR asociados con una cresta o patrón de bloqueo sobre Europa central. Las olas de calor (HW por sus siglas en inglés) son un evento climático extremo cálido que persiste durante varios días. En Cassou, 2005, se muestra que las HW europeas están asociadas a dos regímenes de circulación atmosférica: el Bloqueo (NAO+), así como las condiciones de poco viento mencionadas anteriormente, y la Baja Atlántica.

Se espera que las HW tengan un impacto significativo tanto en la generación (Gutierrez, 2021) como en la demanda de energía (Garrido-Pérez, 2021). En la mayoría de los países del norte y centro de Europa, la demanda de electricidad aumenta en invierno debido a las necesidades de refrigeración. En cambio, en los países del sur de Europa la demanda también aumenta en verano para refrigeración (Leahy, 2012). A pesar de que el balance sobre el consumo total europeo es casi nulo, se espera una polarización entre los países del norte y del sur de Europa en los picos de demanda y consumo (Wenz, 2017).

Dado que la energía eólica es cada vez más importante en el sistema eléctrico, junto con el crecimiento de las olas de calor en longitud e intensidad en condiciones de cambio climático en la región euromediterránea, el objetivo de este trabajo es analizar la demanda energética y la producción eólica en condiciones de olas de calor y sus patrones atmosféricos asociados en el sur de Europa en verano en condiciones de clima presente, para ver si el suministro de energía eólica podría verse comprometido.

2. MÉTODOS

2.1. Datos de demanda de electricidad

Se utilizan datos de demanda eléctrica (en MWh), que representan la potencia media consumida en la red eléctrica, para el período 1989-2019 a nivel país. La demanda de electricidad está modelizada para cada país individual utilizando modelos aditivos generalizados y los datos climáticos de ERA5 siguiendo el enfoque desarrollado en el proyecto europeo Climatic Energy Mixes (CEM). Los datos están disponibles gratuitamente en la base de datos de energía del programa europeo Copernicus climate change service (C3S, <https://climate.copernicus.eu/>).

2.2. Modelo de energía eólica

Las componentes horarias u y v de viento a 100 m (altura estándar de la turbina eólica) del reanálisis ERA5 (Hersbach, 2019) se utilizan para calcular la velocidad del viento diaria (1989-2019). La generación de energía eólica se modela a nivel de

país para los países del sur de Europa siguiendo una metodología basada en estudios previos (Bloomfield, 2020c).

Los datos de ERA5 presentan algunas deficiencias en la representación del campo de viento (Molina, 2021), especialmente sobre áreas montañosas. Como la generación de energía eólica depende principalmente de la velocidad del viento, la potencia instalada y el modelo de turbina, diferentes valores de velocidad del viento podrían subestimar o sobrestimar la producción de energía eólica. Por lo tanto, se realiza una corrección de sesgo de la velocidad media del viento a largo plazo en cada celda de la cuadrícula de ERA5 para que coincida con el valor correspondiente al Global Wind Atlas 3.0 (GWA) como en Lledó, (2019), para tener en cuenta las discrepancias entre las observaciones y los valores del modelo.

2.3. Ola de calor

Las olas de calor (HW) se definen como eventos donde durante, al menos, tres días consecutivos se supera el percentil 90 de la temperatura máxima diaria en una ventana móvil de 31 días durante el período de referencia 1971-2000. Los días de olas de calor para el período (1989-2019) se calculan con las temperaturas máximas diarias de los datos en malla de E-OBS-21.0e (EOBS, <http://www.ecad.eu/>).

En este estudio, las HW se analizan en relación con su impacto potencial en el suministro de electricidad. Por lo tanto, la extensión espacial del evento es importante porque cuanto más grande es, más industrias y población puede afectar. Se investigan las HW que afectan al menos al 30% de la superficie del país estudiado. Dichas áreas con condiciones de HW se consideran solo donde hay población o industria. Específicamente, las celdas donde se presenta más del percentil 60 de la población del país de 2015 (datos disponibles en CIESIN, 2018) se utilizan para calcular tales extensiones de HW.

2.4. Metodología “Weather regimes”

La metodología para determinar los patrones atmosféricos predominantes se basa en la descomposición de la altura geopotencial diaria al nivel de 500 hPa en funciones empíricas ortogonales y su agrupación a través del clustering “k-means” (Cassou, 2005). Los datos de altitud geopotencial de ERA5 a 500 hPa (Z500) se utilizan para calcular los patrones de anomalías diarias de verano (JJA), relacionadas con las olas de calor, para el período 1989-2019.

La metodología se ha aplicado a los países del sur de Europa con datos energéticos disponibles (Grecia, Portugal, España, Italia, Croacia, Hungría, Bulgaria, Serbia, Montenegro, Rumanía, Turquía y Macedonia) en el periodo de verano 1989-2019 (JJA). Se analiza el impacto de las HW en la demanda eléctrica y la producción eólica a escala país, la mayor disponible, para el mayor número de países posible para poder observar sus diferencias, ya que existen pocos trabajos que analicen estos datos o están relegados a uno o dos países. Para cada magnitud se calculan las anomalías normalizadas en días de HW con respecto al verano de todo el periodo. La anomalía se calcula restando a la media en días de HWs, la media de todos los

días de verano. Luego, los valores de anomalía se dividen por la desviación estándar de verano (SD) para evaluar las diferencias con respecto a la variabilidad natural.

3. RESULTADOS

3.1. Weather regimes (WRs)

Para analizar las olas de calor y sus efectos sobre el sistema energético, se estudian los patrones atmosféricos de verano. La Figura 2 muestra el promedio de las anomalías diarias de Z500 asociadas con los WR para el período de verano 1989-2019 (JJA). Siete WR explican el 85% de la varianza estival en la región euromediterránea, denominados WR1 a WR7, con valores de anomalía que oscilan entre -80 y 60 metros.

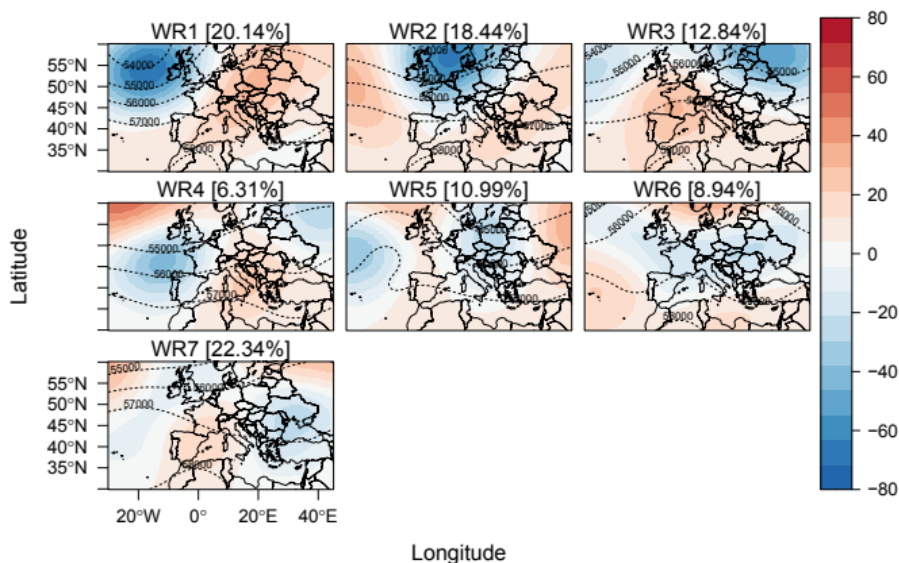


Figure 2. Centroides de los weather regimes (WR) derivados del reanálisis ERA5 para los días JJA del período 1989-2019. Los colores muestran anomalías de altura geopotencial a 500 hPa (en m). Los valores medios de Z500 están representados por líneas discontinuas (en m). En la parte superior de los paneles se muestra el porcentaje de días de olas de calor en que se produce un WR determinado.

Al considerar los días de HW con una extensión superior al 30% del territorio poblado para al menos uno de los países del sur de Europa, la frecuencia de ocurrencia de cada WR oscila entre el 22,34% en el WR7 y el 6,31% en el WR4. Es decir, en los días de HW, el WR7 es el de mayor frecuencia anómala, seguido del WR1 (20,14%), siendo el WR4 el menos frecuente con un 6,31%. De acuerdo con los resultados mostrados por Cassou, 2005) para los dos HW europeas de 2003 en la

región euroatlántica, las HW son más probables en el régimen dominado por una anomalía negativa, o baja presión, sobre el Océano Atlántico Norte y anomalías positivas en el continente europeo. Sin embargo, las HW para todo el Sur de Europa es un criterio muy amplio, por lo que en la Tabla 1 se realiza un análisis más profundo por país.

Al considerar los días de HW para cada país por separado, la frecuencia relativa de cada WR varía (las celdas azules en la Tabla 1 indican la frecuencia más alta para cada país). De esta forma, el WR1 adquiere más relevancia para Italia, Croacia, Montenegro, Hungría, Serbia y Rumanía, con valores que oscilan entre el 28% y el 40%. El WR2, con porcentajes del 32% al 34%, obtiene las frecuencias más altas en Grecia, Bulgaria y Macedonia. Por su parte, en Portugal y Turquía destacan el WR7 con un 34% y un 26% respectivamente, y el WR3 en España con un 27%. Cuando el enfoque se establece en regiones/países específicos, se observan algunas diferencias con respecto a la Figura 1 para los días de HW en cualquiera de estos países, aunque coinciden en que el WR7 obtiene la frecuencia más alta. Se aprecia cierta coherencia entre países vecinos, CR-IT-MO, HU-SR y MD-BG, aunque también se obtienen algunas diferencias en otros como SP-PT.

3.2. Demanda de energía y producción eólica en días de olas de calor

La anomalía de demanda normalizada por país en días de calor se muestra para cada WR en la Tabla 1 para estudiar su variabilidad dentro de cada patrón. La demanda de electricidad en días de ola de calor es mayor de lo normal en todos los países del sur de Europa. Esto se ve en los siete WR, aunque se observan algunas diferencias en la intensidad. Las anomalías más altas se encuentran en algunos países balcánicos en el WR4 (entre 1,5 y 2 SD), seguido de los WR5 y WR6. Por lo tanto, la mayor demanda ocurre en los WR menos frecuentes. Estos resultados están en línea con lo mostrado en trabajos anteriores, donde se muestra que los WR están estrechamente relacionados con los patrones de temperatura y tienen un impacto potencial en la demanda de electricidad (Van der Wiel, 2019).

La producción de energía eólica en días de ola de calor varía en referencia a la generación de verano dependiendo del WR y del país estudiado (Tabla 1). Las anomalías de producción disminuyen en todos los países en la mayoría de los WR, excepto en GR y SR. En general, las anomalías de producción disminuyen de 0 a -0,3 SD, aunque aumentan más de 0,1 SD en España, Portugal, Italia y Serbia en los WR1 o WR3. Se observa una disminución generalizada de la producción eólica en los WR4, WR5, WR6 y WR7 en la mayoría de los países con anomalías que van desde 0 a -0,42 SD. En Turquía, la generación aumenta 0,09, 0,33 y 0,23 SD en WR2, WR4 y WR5 respectivamente, y disminuye hasta -0,25 SD en el resto. Se obtienen resultados similares para los meses de invierno en (Grams, 2017).

Mirando el WR más frecuente para cada país (marcado en azul en la Tabla 1), la producción eólica aumenta para España (0,16), Italia (0,12), Grecia (0,14) y Serbia (0,26), y disminuye para Portugal (-0,26), Croacia (-0,05), Montenegro (-0,06), Hungría (-0,03), Macedonia (-0,11), Bulgaria (-0,15), Rumanía (-0,22) y Turquía (-

0,17). El diferente efecto de los WR entre los países podría estar relacionado con las condiciones atmosféricas que producen un HW en cada país, ya que los WR se calculan para todo el Mediterráneo mientras que aquí se analizan los HW a nivel de país. Por lo tanto, es aconsejable hacer un análisis a una escala más local como se indica en (Garrido-Pérez, 2020).

4.CONCLUSIONES

Este trabajo analiza por primera vez el impacto de las olas de calor (HW) y sus regímenes meteorológicos asociados (WR) en la demanda de electricidad y la producción de energía eólica en el sur de Europa. Se necesitan siete WR para caracterizar los patrones atmosféricos de la temporada de verano (JJA). Se ve que las olas de calor potencialmente peligrosas para el suministro eléctrico en el sur de Europa son más probables cuando las condiciones atmosféricas presentan una

anomalía negativa sobre el océano Atlántico y anomalías positivas sobre el continente europeo. Se ha visto que todos los países euromediterráneos no pueden ser descritos por los mismos patrones atmosféricos, por lo que se encontraría una mejor comprensión en escalas más pequeñas o del tamaño de un país, a pesar de compartir las mismas características generales en términos de ciclo anual de demanda de energía, la producción de energía eólica y las condiciones de las olas de calor.

Se observa un aumento de la demanda eléctrica en los días de ola de calor en todos los países en todos los WR, aunque la mayor demanda se da en las WR menos frecuentes. La producción de energía eólica generalmente disminuye en los días de ola de calor, aunque depende de la WR y del país estudiado.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido apoyado por una beca predoctoral de la Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM), financiada por el Fondo Social Europeo (FSE). Agradecemos al centro de producción de reanálisis ECMWF y al programa Copernicus por facilitar el acceso a los datos de reanálisis. Reconocemos también el conjunto de datos E-OBS del proyecto EU-FP6 UERRA (<https://www.uerra.eu>) y el Servicio de Cambio Climático de Copernicus, y los proveedores de datos en el proyecto ECA&D (<https://www.ecad.ue>). Finalmente, debemos agradecer los datos obtenidos del “Global Wind Atlas 3.0”.

Country		PT	SP	IT	CR	MO	GR	HU	SR	MD	BG	RO	TU
WR1	Freq.	7.78	19.36	31.33	40.68	27.62	13.66	40.69	30.10	23.23	17.07	30.05	11.27
	Demand	0.62	0.53	0.48	0.63	0.65	0.93	0.61	1.04	0.87	1.25	0.82	
	Wind prod.	-0.03	0.08	0.12	-0.05	-0.06	-0.13	-0.03	0.26	-0.02	-0.05	-0.22	-0.25
WR2	Freq.	8.16	9.32	17.01	17.32	23.97	34.53	17.32	25.25	32.45	32.09	24.08	23.65
	Demand	0.48	0.54	0.41	0.70	0.55	0.41	0.61	0.82	0.40	0.43	0.36	
	Wind prod.	-0.46	-0.09	-0.29	-0.31	-0.11	0.14	-0.12	0.07	-0.11	-0.15	-0.09	0.09
WR3	Freq.	23.34	27.51	16.09	6.05	11.45	9.71	6.05	7.91	7.45	6.80	4.24	9.52
	Demand	0.25	0.24	0.30	0.97	1.07	0.90	0.72	1.34	0.89	1.56	0.96	
	Wind prod.	0.10	0.16	-0.16	0.12	-0.28	0.03	0.03	0.35	-0.30	-0.14	-0.24	-0.10
WR4	Freq.	0.19	2.60	3.05	2.94	2.95	2.99	2.94	1.91	2.66	3.46	3.44	7.30
	Demand	0.70	0.89	0.70	1.73	2.07	1.61	0.77	1.34	1.50	2.01	1.43	
	Wind prod.	-0.45	-0.37	-0.30	-0.30	-0.17	0.21	-0.16	0.11	-0.13	-0.18	-0.16	0.33
WR5	Freq.	16.51	10.27	6.73	2.77	6.97	11.27	2.78	6.25	6.03	9.62	4.13	11.42
	Demand	0.27	0.51	0.49	1.34	1.38	1.03	0.83	1.31	0.99	1.69	0.98	
	Wind prod.	-0.12	-0.19	-0.46	-0.30	-0.33	0.06	-0.32	0.07	-0.31	-0.20	-0.26	0.23
WR6	Freq.	2.640	13.11	6.87	6.53	3.90	2.63	6.54	2.30	2.41	3.34	5.38	10.15
	Demand	0.29	0.32	0.37	0.97	1.13	1.04	0.71	1.49	0.98	0.70	0.94	
	Wind prod.	-0.01	0.03	-0.09	-0.35	-0.30	0.00	-0.20	0.31	-0.19	-0.18	-0.30	-0.00
WR7	Freq.	34.34	17.82	18.92	23.69	23.14	25.18	23.69	25.88	24.22	27.60	28.66	26.67
	Demand	0.21	0.45	0.49	0.55	0.35	0.47	0.72	1.02	0.46	0.87	0.42	
	Wind prod.	-0.26	-0.02	-0.19	-0.42	-0.26	-0.12	-0.21	-0.06	-0.20	-0.11	-0.35	-0.17

Table 1. Percentage of heat wave days in a given WR (Freq.), electricity demand anomalies in heat wave days from ERA5 C3S model for the different WRs (Demand) and wind energy production in heat wave days from ERA5 reanalysis data (Wins prod.) by country: Portugal (PT), Spain (SP), Italy (IT), Croatia (CR), Montenegro (MO), Greece (GR), Hungary (HU), Serbia (SR), Macedonia (MD), Bulgaria (BG), Romania (RO), Turkey (TU).

REFERENCIAS

- Alvarez-Castro, D. Faranda, P. Yiou, et al. Atmospheric dynamics leading to west european summer hot temperatures since 1851. *Complexity*, 2018: 2494509–1, 2018.
- Bloomfield, H. C., Brayshaw, D. J. and Charlton-Perez, A. J. Characterizing the winter meteorological drivers of the European electricity system using targeted circulation types. *Meteorological Applications*, 27(1):1–18, 2020. ISSN 14698080. doi: [10.1002/met.1858](https://doi.org/10.1002/met.1858).
- Cassou, C., Terray, L. and Phillips, A. S. Tropical Atlantic influence on European heat waves. *Journal of Climate*, 18(15), 2005. ISSN 08948755. doi: [10.1175/JCLI3506.1](https://doi.org/10.1175/JCLI3506.1).
- Center for International Earth Science Information Network, CIESIN, C.U., 2018. Gridded Population of the World, Version 4 (GPWv4): Population Density, Revision 11. Palisades, NY: NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC). Available at <https://doi.org/10.7927/H49C6VHW>. Accessed June 2021 .
- Garrido-Perez, J.M., Ordóñez, C., Barriopedro, D., García-Herrera, R. and Paredes, D. Impact of weather regimes on wind power variability in western Europe. *Applied Energy*, 264:114731, apr 2020. ISSN 03062619. doi: [10.1016/j.apenergy.2020.114731](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114731).
- Garrido-Perez, J.M., Barriopedro, D., García-Herrera, R. and Ordóñez, C. Impact of climate change on spanish electricity demand. *Climatic Change*, 165(3):1–18, 2021.
- Grams, C.M., Beerli, R., Pfenninger, S., Staffell, I. and Wernli, H. Balancing Europe’s wind-power output through spatial deployment informed by weather regimes. *Nature Climate Change*, 7(8):557–562, 2017. ISSN 17586798. doi: [10.1038/NCLIMATE3338](https://doi.org/10.1038/NCLIMATE3338).
- Gutiérrez, C. , de la Vara, A., González-Alemán, J. J. and Gaertner, M. Impact of Climate Change on Wind and Photovoltaic Energy Resources in the Canary Islands and Adjacent Regions. *Sustainability*, 13(8), 2021. ISSN 2071-1050. doi: [10.3390/su13084104](https://doi.org/10.3390/su13084104).
- Hersbach, H., Bell, W., Berrisford, P., Horányi, A., M.-S. J., Nicolas, J., Radu, R., Schepers, D. , Simmons, A., Soci, C. and Dee, D. Global reanalysis: goodbye ERA-Interim, hello ERA5. *ECMWF Newsletter*, pages 17–24, 04 2019. doi: [10.21957/vf291hehd7](https://doi.org/10.21957/vf291hehd7).
- Holttinen, H., Hourly wind power variations in the nordic countries. *Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology*, 8(2):173–195, 2005.
- Jerez, S., Trigo, R. M., Vicente-Serrano, S. M., Pozo-Vázquez, D., Lorente-Plazas, R., Lorenzo-Lacruz, J., Santos-Alamillos, F. and Montávez, J. P. The impact of the north atlantic oscillation on renewable energy resources in Southwestern Europe. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2013. ISSN 15588424. doi: [10.1175/JAMC-D-12-0257.1.9](https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-0257.1.9).
- Leahy, P. G. and Foley, A. M. Wind generation output during cold weather-driven electricity demand peaks in ireland. *Energy*, 39 (1):48–53, 2012.
- Lledó, L., Torralba, V., Soret, A., Ramon, J. and Doblas-Reyes, F. J. Seasonal forecasts of wind power generation. *Renewable Energy*, 143:91–100, 2019. ISSN 0960-1481. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.135>.

- Molina, M., Sánchez, E., and Gutiérrez, C. Future heat waves over the mediterranean from an Euro-CORDEX regional climate model ensemble. *Scientific reports*, 10(1):1–10, 2020.
- Molina, M. O. Gutiérrez, C. and Sánchez, E. Comparison of ERA5 surface wind speed climatologies over europe with observations from the hadisd dataset. *International Journal of Climatology*, 2021. DOI: [10.1002/joc.7103](https://doi.org/10.1002/joc.7103)
- H. Mukougawa and H. Sato. Multiple weather regimes in the summertime north atlantic circulation. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 77(2):483–494, 1999.
- Sánchez-Benítez, A., Barriopedro, D. and García-Herrera, R. Tracking Iberian heatwaves from a new perspective. *Weather and Climate Extremes*, 28:100238, jun 2020. ISSN 22120947. doi: [10.1016/j.wace.2019.100238](https://doi.org/10.1016/j.wace.2019.100238).
- Staffell, I. and Pfenninger, S. The increasing impact of weather on electricity supply and demand. *Energy*, 145:65–78, 2018. ISSN 0360-5442. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.051>.
- van der Wiel, K., Stoop, L. P., H. van Zuijlen, B. R., Blackport, R., van den Broek, M. A., and Selten, F. M. Meteorological conditions leading to extreme low variable renewable energy production and extreme high energy shortfall. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 111:261–275, 2019b. ISSN 1364-0321. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.065>.
- Wenz, L., Levermann, A., and Auffhammer, M. North–south polarization of european electricity consumption under future warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(38):E7910–E7918, 2017.