

PROYECCIONES CLIMÁTICAS DE ÍNDICES DE TEMPERATURAS EXTREMAS EN CANARIAS

Francisco Javier EXPÓSITO GONZÁLEZ, Juan Pedro DÍAZ GONZÁLEZ, Albano GONZÁLEZ FERNÁNDEZ y Juan Carlos PÉREZ DARIAS
Grupo de Observación de la Tierra y la Atmósfera (GOTA). Universidad de La Laguna. A/Astrofísico Francisco Sánchez s/n. 38200 La Laguna. Tenerife.
fexposit@ull.edu.es

RESUMEN

Las proyecciones de extremos climáticos son esenciales para el diseño de planes estratégicos de adaptación/mitigación a los posibles efectos adversos del cambio climático. Para obtener las proyecciones de los índices de temperaturas extremas en Canarias se aplicó una metodología de downscaling dinámico. Para ello se empleó el modelo WRF con una resolución espacial de 3 km en los periodos 2030-2059 (MID) y 2070-2099 (END), y para los escenarios RCPs 4.5 y 8.5. Las condiciones iniciales se definieron mediante los modelos GFDL-ESM2M, MIROC-ESM e IPSL-CM5. Los cambios a futuro se calcularon frente al período de referencia 1980-2009 (HIS) para los índices extremos dados por el Equipo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI): temperaturas máxima y mínima mensual (TX y TN), máximo mensual del rango de temperatura diurna diaria (DTR), noches tropicales (TR), días cálidos (noches frías) TX90p (TN10p), índice de duración de olas de calor (WSDI) y de olas de frío (CSDI). Además, se analizaron los niveles y periodos de retorno para la temperatura máxima anual utilizando la distribución de valores extremos generalizados (GEV).

Para comprobar la bondad de las parametrizaciones empleadas, los índices modelados en el periodo HIS se compararon con las observaciones de nueve estaciones. Los resultados muestran que las proyecciones futuras siguen la variación en las concentraciones equivalentes de CO₂ utilizadas como entrada. Así, los índices proyectados presentan un aumento de TX (TN) con una media para el período END y RCP8.5 de 4.0±0.5 °C (4.4±0.4). TX90p aumenta considerablemente (30 puntos porcentuales), y el índice TN90p prácticamente se hace cero. Asimismo, los niveles de retorno que en el período HIS se calcularon para un período de retorno de 20 años, se obtienen a lo largo del siglo XXI con períodos de retorno entre 1 y 6 años en el período END con RCP8.5.

Palabras clave: Índices de temperaturas extremas, downscaling dinámico, WRF, CMIP5, GEV.

ABSTRACT

Projections of climate extremes are essential data for the design of strategic plans for adaptation/mitigation to the possible adverse effects of climate change. To obtain projections of extreme temperature indices in the Canary Islands, a dynamic

downscaling methodology was applied. For this purpose, the WRF modeling system was configured with a spatial resolution of 3 km, for the periods 2030-2059 (MID) and 2070-2099 (END), and the RCPs 4.5 and 8.5 scenarios. Initial conditions were defined using three models of the Coupled Model Intercomparison Project 5 (CMIP5): GFDL-ESM2M, MIROC-ESM and IPSL-CM5. Future changes were calculated against the reference period 1980-2009 (HIS). The extreme indices selected were those defined by the Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI): monthly maximum and minimum temperature (TX and TN), monthly maximum of the daily diurnal temperature range (DTR), tropical nights (TR), warm days (cold nights) TX90p (TN10p), warm spell duration index (WSDI) and cold spell duration index (CSDI). In addition, return levels and return periods for annual maximum temperature were analyzed using the generalized extreme value (GEV) distribution.

To check the goodness of the parameterizations used, the modeled indices in the HIS period were compared with those obtained from observations at nine weather stations. Analysis of the results shows that future projections with either model closely follow the variation in CO₂ equivalent concentrations used as input. Thus, the projected indices show an increase in TX (TN) with a mean for the END and RCP8.5 period of 4.0 ± 0.5 °C (4.4 ± 0.4). TX90p increases considerably (30 percentage points), and the TN90p index practically becomes zero. Likewise, the return levels that in the HIS period were calculated for a return period of 20 years, are obtained throughout the 21st century with return periods between 1 and 6 years in the END and RCP8.5 period.

Key words: Extreme temperature indices, dynamic downscaling, WRF, CMIP5, GEV.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de la evolución de los valores extremos de la temperatura en un escenario de cambio climático es crucial, debido a su influencia en aspectos sociales y económicos, tan importantes como la salud humana, la demanda energética, la conservación de los ecosistemas, la agricultura, los recursos hídricos, etc. Entre las conclusiones del Quinto Informe de Evaluación del IPCC, Hartmann et al., (2013) señalan que se han observado cambios en los fenómenos meteorológicos y climáticos extremos desde aproximadamente 1950. En cuanto a las temperaturas extremas, añaden que es muy probable que el número de días y noches fríos haya disminuido, mientras que el de días y noches cálidos ha aumentado a escala global, durante las últimas décadas. Varios estudios muestran que los modelos del Proyecto Coupled Model Intercomparison Project 5 (CMIP5) y CMIP6 tienden a sobreestimar los extremos diurnos cálidos y a subestimar los extremos nocturnos fríos, ya sea a escala global o regional (Di Luca et al., 2020a; Sillmann et al., 2013). Un análisis de las posibles fuentes de error ha demostrado que el rendimiento global de los modelos CMIP mejora al aumentar la resolución horizontal, principalmente debido a la mejor representación de la variabilidad a escala sinóptica (Di Luca et al., 2020b). Las islas se encuentran entre las regiones más sensibles en cuanto a los posibles efectos adversos del cambio climático a lo largo del siglo XXI (Nurse et al., 2014).

Varios estudios han abordado la realización de proyecciones climáticas en Canarias tanto con downscaling dinámico (Pérez et al., 2014; Expósito et al., 2015) como con aproximaciones estadísticas (AEMET, 2021). También se han estudiado los posibles cambios a lo largo de este siglo de los recursos renovables (González et al. 2017; Pérez et al., 2019). Todos estos trabajos, que han utilizado el downscaling dinámico, se basan en la metodología del pseudo calentamiento global (PGW) con una resolución de 5 km. Sin embargo, el principal inconveniente de la metodología PGW es que no considera todos los posibles mecanismos involucrados en el cambio climático. Por otro lado, Canarias, y la región macaronésica son islas con una orografía compleja que, junto con las condiciones climáticas predominantes (principalmente, los vientos alisios y la capa de inversión térmica), configuran un intrincado conjunto de microclimas. Pérez et al. (2014) han demostrado que la realización de simulaciones a escalas que permiten la convección, reproduce adecuadamente los procesos de interacción tierra-atmósfera-mar. Estos están en el centro de los cambios que pueden afectar a la evolución de las temperaturas extremas: cambio en el régimen nuboso dominante (estratocúmulos marinos) a cúmulos poco profundos (Díaz et al., 2019), disminución de la nubosidad en invierno (Pérez et al., 2019) o disminución de los vientos superficiales en verano (González et al., 2017).

2. MÉTODOS

2.1. Datos observacionales e índices de temperatura extremos

La información observacional utilizada en este estudio se ha obtenido del European Climate Assessment and Dataset (ECAD, 2021; Klok y Tank, 2009; Klein Tank et al., 2002). En esta base de datos, se aplicó la metodología de Wijngaard et al. (2003) para comprobar la homogeneidad de la temperatura diaria del aire en superficie y la precipitación. ECAD produce los índices extremos definidos por el Equipo de Expertos en Detección e Índices del Cambio Climático (ETCCDI) (Klein Tank et al., 2009; Zhang et al., 2011), proporcionando dos tipos de índices: índices absolutos obtenidos directamente de los valores extremos, y variables de umbral. Estos requieren un nivel base obtenido a partir de un periodo de referencia (1961-1990). En este estudio estos índices fueron recalculados para el periodo de referencia 1980-2010 (HIS), empleando para ello el software Climate Data Operator (CDO) (Schulzweida, 2019). Los índices de temperaturas extremas analizados en este trabajo se detallan a continuación.

Índices absolutos: TX, máximo mensual (°C); el máximo mensual de las Tx. TN, mínimo mensual (°C); el mínimo mensual de las Tn. DTR, máximo mensual del rango de temperaturas diarias (°C); el máximo mensual del rango de temperaturas diurnas diarias.

Índices umbrales: TR, noches tropicales anuales (días al año); el número de días al año con $T_n > 20$ °C. WSDI, índice de duración de olas de calor (días al año); el número total de días con al menos 6 días consecutivos en los que Tx es mayor que el percentil 90 (90p) de la temperatura máxima diaria para un determinado día del año. El 90p se calcula para una ventana de 5 días centrada en el día particular del año. WSDIn, número de eventos de olas de calor (eventos al año); la cuenta anual de eventos WSDI. CSDI, índice de duración de olas de frío (días al año); el número total de días con al

menos 6 días consecutivos en los que T_n es menor que el percentil 10 (10p) de la temperatura mínima diaria para un determinado día del año. El 10p se calcula para una ventana de 5 días centrada en el día particular del año. CSDIn, número de eventos de olas de frío (eventos al año); la cuenta anual de eventos CSDI. TX90p, días cálidos (días al mes); el número de días al mes con $T_x > 90p$, donde 90p se calcula para una ventana de 5 días centrada en el día particular del año. TN10p, días fríos (días al mes); el número de días al mes con $T_n < 10p$, donde 10p se calcula para una ventana de 5 días centrada en el día particular del año.

Todos estos índices se analizaron en nueve estaciones, las cuales también se utilizaron para estimar las incertidumbres de estas magnitudes obtenidas mediante modelización (Fig. 1).

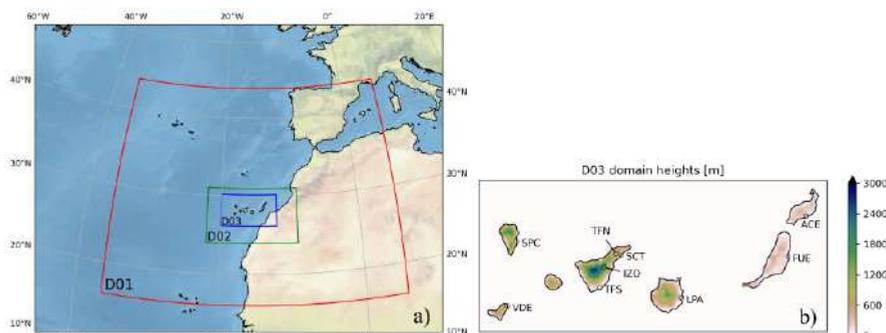


Fig. 1: Configuración de los dominios del modelo WRF: D01 resuelto a 27 km, D02 a 9 km y D03 a 3 km, y situación de las estaciones utilizadas.

2.2. Metodología de modelización y configuración del modelo WRF

Para obtener una mejor representación de los procesos que afectan a los extremos climáticos en una región como las Islas Canarias, se utilizó una técnica de downscaling dinámico basada en el modelo Weather Research and Forecast (WRF) (Skamarock et al., 2008). La versión del WRF (3.4.1), la configuración y los niveles verticales de las simulaciones se seleccionaron siguiendo los resultados previos de Pérez et al. (2014). Se definieron tres dominios con resoluciones de 27, 9 y 3 km en una configuración de anidamiento unidireccional (Fig. 1), y todos ellos con 32 niveles verticales eta. Los resultados analizados fueron los obtenidos en el dominio D03 (3 km), para los periodos: 1980-2009, 2030-2059 y 2070-2099, y para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 (Taylor et al., 2012).

Todas las simulaciones se inicializaron un año antes para proporcionar un periodo de estabilización de la física del modelo. Estos datos se excluyeron de cualquier análisis posterior. Los procesos microfísicos de las nubes se parametrizaron utilizando el esquema WDM6. El esquema de radiación se estableció según el Modelo “Community Atmosphere Model” con concentraciones de gases ajustadas a cada escenario. El modelo de superficie terrestre se estableció según el modelo Noah y el esquema de capa límite planetaria se caracterizó utilizando el esquema de la Universidad de Yonsei. Además, el esquema de parametrización de cúmulos de Kain-Fritsch sólo se utilizó en los dos dominios más externos (D01 y D02). En el dominio

más interno (D03) no se aplicó ninguna parametrización de cúmulos porque en estas resoluciones los flujos se resuelven explícitamente (Skamarock et al., 2019). La configuración del WRF empleada fue la seleccionada por Pérez et al. (2014) como la que tiene los mínimos errores en la región de Canarias. Las simulaciones climáticas utilizaron como datos de entrada los aportados por los siguientes modelos incluidos en CMIP5: GFDL-ESM2M (Dunne et al., 2013), MIROC-ESM (Watanabe et al., 2011) e IPSL-CM5A-MR (Dufresne et al., 2013).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Evaluación del modelo WRF con los índices absolutos y umbrales

Para evaluar las incertidumbres de los datos modelados, se compararon los resultados de la simulación realizada con datos ERA-Interim para el periodo 1995 a 2004 (Pérez et al., 2014) con los datos observacionales de ECAD. Para ello, se emplearon los valores correspondientes al píxel más cercano a las estaciones ECAD para TX y TN. Excepto para la estación IZO, el análisis cuantil-cuantil (Q-Q) mostró que, en promedio, las pendientes variaron entre 1.20 y 0.95 para TX y TN respectivamente (ideal = 1.00), con un coeficiente de correlación de Pearson superior a 0.98. Esta comparación también muestra que el modelo introduce un sesgo que, en promedio, es de -2,6 °C y -2,1 °C para TX y TN respectivamente.

Para evaluar las incertidumbres de las simulaciones también se compararon las observaciones con los valores simulados correspondientes al punto de la cuadrícula terrestre más cercano. Se observó que, como en el caso anterior, existe un sesgo entre estos conjuntos de datos. Las temperaturas máximas y mínimas diarias simuladas (Tx y Tn) y por tanto las máximas y mínimas mensuales (TX y TN) presentan una subestimación respecto a los datos del ECAD. El modelo IPSL genera los mayores sesgos, en promedio 2.9 y 3.7 °C para TX y TN respectivamente, mientras que el MIROC produce los menores (0.7 y 1.6 °C para TX y TN).

Por otra parte, se compararon las anomalías utilizando una segunda estrategia que calcula el skill-score de Perkins para la densidad de probabilidad (PDF) (Perkins et al., 2007). El skill-score para los índices absolutos y todas las estaciones oscila entre 0.68 y 0.96 con una media de 0.85 ± 0.06 (ideal=1.0). En lo que respecta a los valores umbral, las proyecciones producen un valor que, en promedio para todas las estaciones y modelos es de 0.61 ± 0.26 .

3.2. Evaluación del modelo WRF con los periodos y niveles de retorno

Otra variable importante utilizada para evaluar los eventos extremos de temperatura es el periodo de retorno, T. En este caso el periodo de retorno y el nivel de retorno se estimaron ajustando la distribución generalizada de valores extremos (GEV) al máximo anual de los datos observacionales y modelados de Tx. Los intervalos de confianza en los periodos de retorno se estimaron mediante la técnica de bootstrapping utilizando 1000 muestras aleatorias con reemplazo y un intervalo de confianza del 95% (Mooney y Duval, 1993). Los valores medios de la mayoría de las estaciones se aproximan a los obtenidos a partir de las observaciones, con un solapamiento en sus intervalos de confianza. Los resultados de la simulación basada en el MIROC son los más cercanos, con una diferencia de 0.6 °C de media para todas las estaciones. El

intervalo de confianza de la temperatura máxima de retorno a partir de las observaciones se sitúa en torno a 1 °C. Estos valores máximos de temperatura constituyen los niveles de retorno sobre los que se calcularán los periodos de retorno en las proyecciones futuras.

3.3. Proyecciones en el Siglo XXI para los índices absolutos y umbrales

Para observar los cambios en las variables extremas, se compararon las diferencias entre las proyecciones de los ensembles de los tres modelos para los periodos MID (2030-2059) y END (2070-2099), frente a HIS (1980-2009), para los dos escenarios RCP4.5 y RCP8.5. Para evaluar las incertidumbres en los cambios proyectados, se utilizó una estrategia de bootstrapping con al menos 1000 muestras para cada píxel. Un valor se considera estadísticamente significativo si su intervalo de confianza al 95% no incluye el valor cero.

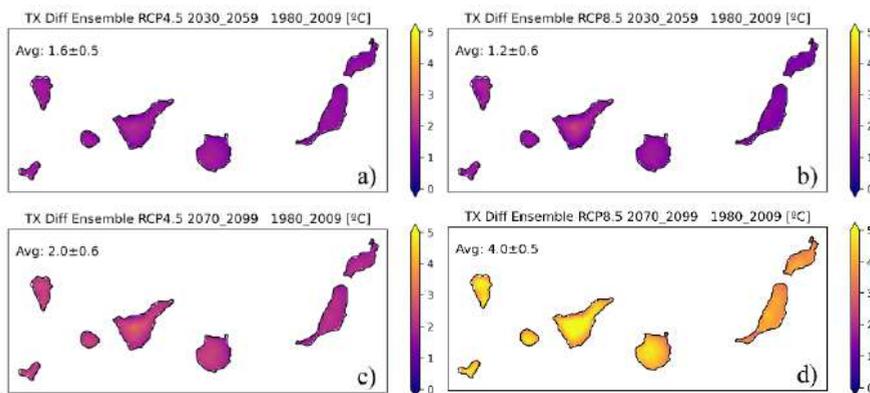


Fig. 2: Diferencias medias para la variable TX (°C) entre las simulaciones para las proyecciones futuras (MID y END) y el pasado reciente (HIS). Corresponden a los escenarios de emisiones de efecto invernadero RCP4.5 (columna izquierda) y RCP8.5 (columna derecha). Todos los valores son estadísticamente significativos con un nivel de confianza del 95%.

Las proyecciones para el periodo MID muestran que las diferencias en TX y TN con respecto a HIS son inferiores a 0.4 °C entre los escenarios RCP. Se obtiene un valor de 1.6 ± 0.5 °C en la media para el aumento de TX, mientras que se encuentra un valor de 1.4 ± 0.4 °C en el caso de TN, ambos para el escenario RCP4.5. Si se considera el RCP8.5 los valores son 1.2 ± 0.6 °C para TX y 2.4 ± 0.4 °C para TN. El comportamiento cambia para el periodo END con un aumento de la temperatura en el escenario RCP8.5 respecto al RCP4.5. Se observan variaciones de 4.0 ± 0.5 °C en TX y 4.4 ± 0.4 °C en TN para END-HIS RCP8.5, mientras que este valor en el RCP4.5 es de 2.0 ± 0.6 °C y 2.7 ± 0.4 °C para TX y TN, respectivamente (Fig. 2). Este comportamiento es consistente con el valor de la concentración equivalente de CO₂ de los RCPs: para el RCP4.5, la cantidad de este gas de efecto invernadero permanece casi constante después de la mitad del siglo, mientras que hay un aumento continuo en el caso del

RCP8.5 (Meinshausen et al., 2011). Se observa que el mayor incremento se produce en la parte central de las islas con mayor relieve.

En cuanto a los índices umbrales, el aumento detectado en TN también produce un aumento de noches tropicales (TR). En el periodo MID el aumento es similar entre los dos escenarios, sin embargo, aparecen cambios notables para el periodo END. En el caso del RCP4.5, el número de TR es similar al del periodo MID, pero si consideramos el RCP8.5, el número de noches tropicales aumenta, de media, tres veces en las zonas costeras y en las islas orientales (Fig. 3). Las zonas con temperaturas máximas y noches tropicales más elevadas coinciden con la zona donde se ubican la mayoría de las infraestructuras hoteleras de las islas. El turismo constituye la principal actividad económica del archipiélago.

3.4. Proyecciones en el Siglo XXI para los periodos de retorno

Utilizando el nivel de retorno a 20 años para la temperatura máxima en el pasado reciente (HIS), se calcularon los períodos de retorno en las proyecciones futuras. Debido al aumento de la temperatura previsto por los modelos, cabe esperar una reducción del periodo de retorno. Así, a mediados de siglo, este parámetro se sitúa, por término medio, entre 4 y 5 años en función del RCP utilizado. Al final del periodo, este valor descende a 3 años para las simulaciones que emplean las previsiones del escenario RCP4.5 y a unos 2 años para el escenario RCP8.5.

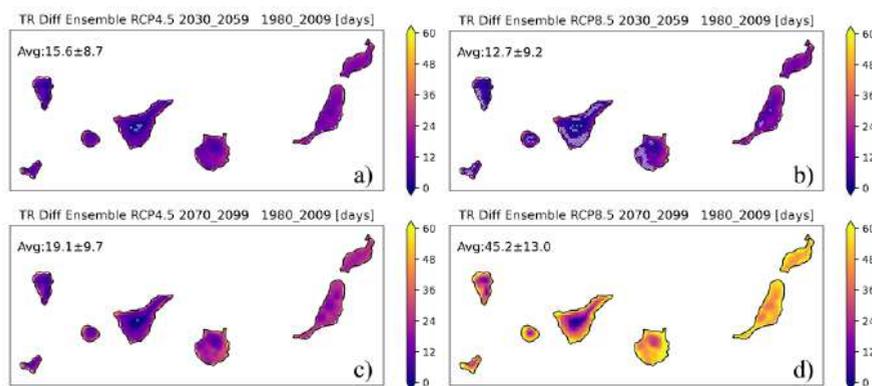


Fig. 3. Igual que la Fig. 2 pero para el número de noches tropicales (TR). Los puntos blancos indican píxeles sin significancia estadística al 95%.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al grupo de trabajo “World Climate Research Programme’s Working Group on Coupled Modelling”, responsable del CMIP. Este trabajo fue financiado por los proyectos CGL2015-67508-R, y RTC-2017-6409-3, Ministerio de Ciencia e Innovación, España. Los autores agradecen el apoyo del Proyecto PLANCLIMAC (MAC / 3.5b / 244), el cual está financiado por el Programa INTERREG MAC 2014-2020 de la Unión Europea, cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER-FEDER). También se agradece el apoyo del Gobierno de Canarias, Consejería de Transición Ecológica, Lucha contra el Cambio Climático y

Planificación Territorial, (acuerdo publicado: B.O.C. nº 238, 20 de noviembre de 2020). Los datos de TSM de alta resolución de la NOAA fueron proporcionados por el PSL de la NOAA/OAR/ESRL, Boulder, Colorado, EE.UU., desde su sitio web.

REFERENCIAS

- AEMET, National Meteorological Agency, Spain, (2021). Climate projections along the XXI century. http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat
- Di Luca, A., A.J. Pitman, R. de Elia, (2020a). Decomposing Temperature Extremes Errors in CMIP5 and CMIP6 Models. *Geophysical Research Letters* 47. doi: <http://dx.doi.org/10.1029/2020GL088031>
- Di Luca, A., R de Elia, M Bador, D Argueso, (2020b). Contribution of mean climate to hot temperature extremes for present and future climates. *Weather and Climate Extremes* 28. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wace.2020.100255>
- Díaz, J.P., Expósito, F.J., Pérez, J.C., González, A., Wang, Y., Haimberger, L., & Wang, J., (2019). Long-Term Trends in Marine Boundary Layer Properties over the Atlantic Ocean, *Journal of Climate*, 32(10), 2991-3004. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0219.1>
- Dufresne, J.L., M.A. Foujols, S. Denvil, A. Caubel, O. Marti, O. Aumont, Y. Balkanski, S. Bekki, H. Bellenger, R. Benshila, S. Bony, L. Bopp, P. Braconnot, P. Brockmann, P. Cadule, F. Cheruy, F. Codron, A. Cozic, D. Cugnet, N. de Noblet, J.P. Duvel, C. Ethe, L. Fairhead, T. Fichet, S. Flavoni, P. Friedlingstein, J.Y. Grandpeix, L. Guez, E. Guilyardi, D. Hauglustaine, F. Hourdin, A. Idelkadi, J. Ghattas, S. Joussaume, M. Kageyama, G. Krinner, S. Labetoulle, A. Lahellec, M.P. Lefebvre, F. Lefevre, C. Levy, Z.X. Li, J. Lloyd, F. Lott, G. Madec, M. Mancip, M. Marchand, S. Masson, Y. Meurdesoif, J. Mignot, I. Musat, S. Parouty, J. Polcher, C. Rio, M. Schulz, D. Swingedouw, S. Szopa, C. Talandier, P. Terray, N. Viovy, N. Vuichard, (2013). Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5. *Climate Dynamics* 40, 2123-2165. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-012-1636-1>
- Dunne, J.P., J.G. John, E. Shevliakova, R.J. Stouffer, J.P. Krasting, S.L. Malyshev, P.C.D. Milly, L.T. Sentman, A.J. Adcroft, W. Cooke, K.A. Dunne, S.M. Griffies, R.W. Hallberg, M.J. Harrison, H. Levy, A.T. Wittenberg, P.J. Phillips, N. Zadeh, (2013). GFDL's ESM2 Global Coupled Climate-Carbon Earth System Models. Part II: Carbon System Formulation and Baseline Simulation Characteristics. *Journal of Climate* 26, 2247-2267. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00150.1>
- ECAD, (2021). European Climate Assessment and Dataset. <https://www.ecad.eu>
- Expósito, F.J., A. González, J.C. Pérez, J.P. Díaz, D. Taima, (2015). High-Resolution Future Projections of Temperature and Precipitation in the Canary Islands. *Journal of Climate* 28, 7846-7856. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0030.1>
- González A., J.C. Pérez, J.P. Díaz, F.J. Expósito, (2017). Future projections of wind resource in a mountainous archipelago, Canary Islands, *Renewable Energy* 104, 120 – 128, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.021>
- Hartmann, D.L., A.M.G. Klein Tank, M. Rusticucci, L.V. Alexander, S. Bronnimann, Y. Charabi, F.J. Dentener, E.J. Dlugokencky, D.R. Easterling, A. Kaplan, B.J. Soden, P.W. Thorne, M. Wild and P.M. Zhai, (2013): Observations: Atmosphere and Surface.

In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. doi: <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9781107415324.008>

Klein Tank, A.M.G., J.B. Wijngaard, G.P. Konnen, R. Bohm, G. Demaree, A. Gocheva, M. Mileta, S. Pashiardis, L. Hejkrlik, C. Kern-Hansen, R. Heino, P. Bessemoulin, G. Muller-Westermeier, M. Tzanakou, S. Szalai, T. Palsdottir, D. Fitzgerald, S. Rubin, M. Capaldo, M. Maugeri, A. Leitass, A. Bukantis, R. Aberfeld, A.F.V. Van Engelen, E. Forland, M. Miletus, F. Coelho, C. Mares, V. Razuvaev, E. Nieplova, T. Cegnar, J.A. Lopez, B. Dahlstrom, A. Moberg, W. Kirchhofer, A. Ceylan, O. Pachaliuk, L.V. Alexander, P. Petrovic, (2002). Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment. *International Journal of Climatology* 22, 1441-1453.

doi: <http://dx.doi.org/10.1002/JOC.773>

Klein Tank, A.M.G., F.W. Zwiers, X. Zhang, (2009). Guidelines on Analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation. Climate data and monitoring WCDMP-No. 72, WMO-TD. WMO, Technical Document 55. ISBN: 940074479X.

Klok, E.J., A.M.G.K. Tank, (2009). Updated and extended European dataset of daily climate observations. *International Journal of Climatology* 29, 1182-1191.

doi: <http://dx.doi.org/10.1002/JOC.1779>

Meinshausen, M., S.J. Smith, K. Calvin, J.S. Daniel, M.L.T. Kainuma, J. Lamarque, K. Matsumoto, S.A. Montzka, S.C.B. Raper, K. Riahi, others, (2011). The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic change* 109, 213–241 Springer. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-011-0156-z>

Mooney, C. Z., & Duval, R. D. (1993). Bootstrapping. SAGE Publications, Inc.

doi: <http://dx.doi.org/10.4135/9781412983532>

Nurse, L.A., R.F. McLean, J. Agard, L.P. Briguglio, V. Duvat-Magnan, N. Pelesikoti, E. Tompkins, and A. Webb, (2014): Small islands. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1613-1654.

Pérez, J.C., J.P. Díaz, A. González, F.J. Expósito, F. Rivera-Lopez, D. Taima, (2014). Evaluation of WRF Parameterizations for Dynamical Downscaling in the Canary Islands. *Journal of Climate* 27, 5611-5631. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00458.1>

Pérez, Juan C., Albano González, Juan P. Díaz, Francisco J. Expósito, Jonatán Felipe, (2019). Climate change impact on future photovoltaic resource potential in an orographically complex archipelago, Canary Islands. *Renewable Energy*, Volume 133, 749-759. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.077>.

- Perkins, S.E., A.J. Pitman, N.J. Holbrook, J. McAneney, (2007). Evaluation of the AR4 climate models' simulated daily maximum temperature, minimum temperature, and precipitation over Australia using probability density functions. *Journal of Climate* 20, 4356-4376. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI4253.1>
- Schulzweida, U., (2019). CDO User Guide. doi: <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.3539275>
- Sillmann, J., V.V. Kharin, X. Zhang, F.W. Zwiers, D. Bronaugh, (2013). Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 1. Model evaluation in the present climate. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 118, 1716-1733. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/jgrd.50203>
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, (2008). A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, 113 pp. doi: <http://dx.doi.org/10.5065/D68S4MVH>
- Skamarock, W.C. J.B. Klemp, J. Dudhia, D.O. Gill, Z. Liu, J. Berner, W. Wang, J.G. Powers, M.G. Duda, D.M. Barker, X. Huang, (2019). A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4. NCAR Technical Notes, NCAR/TN-556+STR. doi: <http://dx.doi.org/10.5065/1dfh-6p97>
- Taylor, K.E., R.J. Stouffer, G.A. Meehl, (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93, 485–498 American Meteorological Society. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
- Watanabe, S., T. Hajima, K. Sudo, T. Nagashima, T. Takemura, H. Okajima, T. Nozawa, H. Kawase, M. Abe, T. Yokohata, T. Ise, H. Sato, E. Kato, K. Takata, S. Emori, M. Kawamiya, (2011). MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. *Geoscientific Model Development* 4, 845-872. doi: <http://dx.doi.org/10.5194/gmd-4-845-2011>
- Wijngaard, J.B., A.M.G.K. Tank, G.P. Konnen, (2003). Homogeneity of 20th century European daily temperature and precipitation series. *International Journal of Climatology* 23, 679-692. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/joc.906>
- Zhang, X.B., L. Alexander, G.C. Hegerl, P. Jones, A.K. Tank, T.C. Peterson, B. Trewin, F.W. Zwiers, (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wiley Interdisciplinary Reviews-Climate Change* 2, 851-870. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/wcc.147>