

CAMBIO CLIMÁTICO, ARIDEZ Y SEQUÍAS EN CANARIAS

Sara HERNÁNDEZ BARRERA¹, Judith CARRILLO PÉREZ², Albano J. GONZÁLEZ FERNÁNDEZ², Juan Carlos PÉREZ DARIAS², Francisco J. EXPÓSITO GONZÁLEZ², Juan Pedro DÍAZ GONZÁLEZ², Jesús F. RODRÍGUEZ ÁLAMO¹

¹*Instituto Tecnológico y de Energías Renovables (ITER), S.A.*

²*Grupo de Observación de la Tierra y la Atmósfera (GOTA). Universidad de La Laguna. A/Astrofísico Francisco Sánchez s/n. 38200 La Laguna. Tenerife.*

shernandezbarrera@iter.es

RESUMEN

El cambio climático supone un factor de gran incertidumbre en cuanto a la posible evolución de los niveles de aridez y de sequía. Por una parte, se prevé un aumento de la evapotranspiración y por otra, el comportamiento de la precipitación presenta importantes diferencias regionales. En este trabajo se han analizado las proyecciones de la aridez y de las futuras sequías en las Islas Canarias, en términos de frecuencia, duración y severidad, utilizando el modelo Weather Research and Forecasting (WRF) para el periodo 2070-2099, y para los escenarios Representative Concentration Pathways (RCPs) 4.5 y 8.5. Las condiciones iniciales y de contorno se definieron mediante tres modelos incluidos en el Coupled Model Intercomparison Project 5 (CMIP5): GFDL-ESM2M, MIROC-ESM e IPSL-CM5. Los cambios futuros de la aridez se obtuvieron empleando el cambio en el índice de aridez (ACI), basado en la relación entre el cambio fraccional de la evaporación potencial y de la precipitación respecto al periodo de referencia 1981-2009. En el caso de la sequía, se utilizó el índice estandarizado de precipitación (SPI) para las escalas de tiempo de 3 y 12 meses. Asimismo, se consideraron eventos de sequía extrema (eventos extremos húmedos) cuando el SPI toma valores por debajo (por encima) de -2 (2). A partir de los resultados obtenidos, podemos destacar que la aridez y los eventos de sequía extrema aumentarán a finales de siglo respecto al periodo de referencia, para ambos escenarios.

Palabras clave: Índice Estandarizado de Precipitación, Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración, Aridez, Proyecciones Climáticas, WRF

ABSTRACT

Climate change is a great relevance factor in the evolution of aridity and droughts due to increase of evapotranspiration and the behavior of precipitation. In this work, we analyses climate change projections in terms of frequency, duration, and severity of future aridity and drought in the Canary Island with the Weather Research and Forecasting (WRF) model driven by some Coupled Models Intercomparison Project phase 5 (CMIP5) simulations, for the period 2070-2099 and for two Representative

Concentration Pathways (RCP) scenarios (RCP4.5 and RCP8.5). Initial and boundary conditions were defined using three models of the Coupled Model Intercomparison Project 5 (CMIP5): GFDL-ESM2M, MIROC-ESM and IPSL-CM5. Aridity change index was obtained to assessment future changes of aridity, which is based on the fractional change of potential evapotranspiration and precipitation with respect to the reference period (1981-2009). To evaluate droughts, the Standardized Precipitation Index (SPI) was applied at the 3 and 12-month time scales. In addition, extreme drought (wet) events are considered when SPI is lower (higher) than -2 (2). The results show an increase of extreme aridity and drought events by the end of this century with respect to the reference period for both emission scenarios.

Key words: Standardized Precipitation Index, Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, Aridity, Climate Projections, WRF.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales peligros naturales que puede causar impactos severos y duraderos en la economía, la agricultura y el medio ambiente (Wilhite y Glantz, 1985) son las sequías, y se espera que su frecuencia y severidad cambie en el futuro debido al cambio climático (Dai, 2012, Van Loon et al., 2016). La sequía es difícil de detectar y monitorizar por diferentes razones: no cuenta con una definición generalmente aceptada; se desarrolla lentamente, y su comienzo y final son indeterminados; y su impacto no es estructural, pudiendo afectar a grandes áreas (Wilhite, 2000).

A lo largo de los años se han desarrollado numerosos índices para evaluar y cuantificar las sequías, abarcando desde índices sencillos, como los percentiles de precipitación a índices complejos como el Índice de Palmer. Sin embargo, la Organización Mundial de Meteorología en 2012 (WMO, 2012) recomienda el índice SPI para desarrollar y reforzar las capacidades de vigilancia y alerta temprana de la sequía, debido a su fácil cálculo a diferentes escalas temporales, permitiendo identificar diferentes tipos de sequía.

Investigar sobre la sequía y la aridez se ha convertido en un tema muy relevante en las últimas décadas, debido a su gran impacto. Las proyecciones sobre el cambio climático en España indican un aumento de temperatura y una creciente aridez, lo que favorece a los procesos de desertificación (MAPAMA, 2016). Canarias a pesar de encontrarse en una situación de marcada sobreexplotación de sus recursos hídricos (Morales et al., 2000), son escasos los estudios de impactos de sequías y aridez que tienen en cuenta a las islas ya que los modelos climáticos globales utilizados presentan ciertas limitaciones a la hora de evaluar superficies pequeñas con orografía compleja, como es el caso de Canarias, debido a la insuficiente resolución de los modelos. Por ello, en este trabajo se evalúan la aridez y los episodios de sequía extrema a finales de siglo a partir del cambio en el índice de aridez y el índice de sequías SPI, utilizando el modelo WRF y considerando diferentes escenarios de emisiones (RCPs 4.5 y 8.5). El trabajo se organiza de la siguiente manera: en la sección de datos y métodos se describen los datos utilizados en este estudio y el proceso de calidad llevado a cabo, el índice de sequía y de aridez utilizados para obtener las proyecciones de la aridez y las sequías en Canarias, así como la metodología y configuración del modelo WRF.

En la sección de resultados se analizan las incertidumbres de modelo y las proyecciones de la aridez y la sequía en términos de frecuencia, duración y severidad. Y en la sección de conclusiones se resumen los principales hallazgos de este estudio.

2. DATOS Y MÉTODOS

2.1. Datos observacionales

En este trabajo se han utilizado los datos de precipitación, temperatura, velocidad de viento y nubosidad mensual para el periodo 1981-2009, proporcionados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMet). Esta base de datos fue sometida a un proceso de control de calidad, en el que se descartaron aquellas estaciones que no disponían de todas las variables climáticas y con más de un 10% de huecos. De manera que, sólo fueron seleccionadas 16 de las 42 estaciones meteorológicas disponibles inicialmente. Asimismo, los datos fueron agrupadas según los termotipos de vegetación en 4 intervalos de altitud: 0-400 m, 400-1100 m, 1100-2100 m, > 2100 m.

2.2. Metodología de modelización y configuración del modelo WRF

En lo que respecta a la modelización se ha utilizado el modelo Weather Research and Forecast (WRF) (Skamarock et al., 2008). En este caso, se han definido 3 dominios con resoluciones espaciales de 27, 9 y 3 km (D01, D02 y D03, respectivamente), en una configuración de anidamiento unidireccional, con 32 niveles eta verticales. Las consideraciones sobre la parametrización utilizada en este trabajo corresponden a las indicadas por Pérez et al. (2014). Así, para parametrizar los procesos microfísicos de las nubes se utilizó el esquema WRF de doble momento de 6 clases (WDM6) (Lim y Hong, 2010). Para el modelo de superficie terrestre se eligió el modelo Noah (Chen y Dudhia, 2001), mientras que el esquema de radiación fue el Community Atmosphere Model con concentraciones de gases ajustadas a cada escenario (Collins et al., 2006). Para la capa límite planetaria, se seleccionó el esquema de la Universidad de Yonsei (Hong et al., 2006) y, por último, el esquema de parametrización de cúmulos de Kain-Fritsch (Kain y Fritsch, 1990) se fijó sólo en los dominios más exteriores (D01 y D02). Con la resolución espacial utilizada en el dominio más interno (D03), los flujos se resuelven explícitamente (Skamarock et al., 2019), por lo que no es necesario establecer esta parametrización.

El modelo se ha utilizado para predecir las variables necesarias en el cálculo de los índices de sequía SPI y SPEI e índice de aridez ACI en el periodo 2070-2099 y bajo los escenarios climáticos RCP4.5 y RCP8.5 (Taylor et al., 2012). Para estas simulaciones, las condiciones iniciales y de contorno fueron las obtenidas por los modelos de circulación global (GCM) incluidos en el proyecto Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) 5. En concreto, los modelos utilizados fueron: GFDL-ESM2M (Dunne et al., 2013), MIROC-ESM (Watanabe et al., 2011) e IPSL-CM5 (Dufresne et al., 2013), utilizando la realización r1i1p1 para todos ellos. Las simulaciones se inician un año antes del periodo indicado para dar estabilidad a la física del modelo, pero no se han incluido en el análisis posterior de los dominios. Los resultados mostrados en este trabajo corresponden al dominio D03.

2.3. Índices de sequía: SPI

El índice SPI (Standardized Precipitation Index) fue propuesto por McKee et al. (1993) para cuantificar el déficit de precipitación a diferentes escalas temporales. Se define como el número de desviaciones estándar de la precipitación caída a lo largo de un período, respecto de la media, una vez que la distribución original de la precipitación ha sido transformada a una distribución normal (Edwards y McKee, 1997). Se considera sequía cuando el índice toma valores menores o igual a -0.99, finalizando cuando el SPI toma valores positivos.

Valores SPI	Categoría
$SPI \geq 2.0$	Extremadamente húmedo
$1.5 < SPI < 1.99$	Muy húmedo
$1.0 < SPI < 1.49$	Moderadamente húmedo
$0.99 < SPI < -0.99$	Normal
$-1.0 < SPI < -1.49$	Moderadamente seco
$-1.5 < SPI < -1.99$	Muy seco
$SPI \leq -2.0$	Extremadamente seco

Tabla 1: Clasificación de las sequías según el índice SPI. Fuente: WMO, 2012.

El índice de sequía se obtuvo, para la escala de tiempo de 3 y 12 meses (SPI-3 y SPI-12), utilizando las simulaciones del modelo WRF con el fin de detectar las sequías agrícolas e hidrológicas, respectivamente. Para ello, se ha utilizado el paquete SPEI disponible en el software estadístico R (Beguería y Serrano, 2014). Asimismo, el índice de sequía SPI se obtuvo con los datos de las 16 estaciones para evaluar la incertidumbre de los índices modelados.

2.4. Índice de Aridez

El cambio en el índice de aridez (ACI, Aridity Change Index) (Karnauskas, 2016) se basa en la relación entre el cambio fraccional de la evapotranspiración potencial (PE) y el cambio fraccional de la precipitación (P):

$$ACI = \frac{\frac{PE_F}{PE_H}}{\frac{P_F}{P_H}}$$

donde los subíndices H y F hacen referencia al periodo histórico y futuro, respectivamente. En la Tabla 2, se muestran las condiciones de aridez según el valor del índice ACI.

ACI	Condición
$ACI < 1$	Condiciones Húmedas
$ACI \approx 1$	No proyecta cambios de aridez
$ACI > 1$	Condiciones secas

Tabla 2: Condiciones de aridez según el índice ACI. Fuente: Karnauskas, 2016.

3. RESULTADOS

3.1. Evaluación de las simulaciones del modelo WRF de los índices de sequía

Las incertidumbres del índice SPI modelado, se evaluaron comparando gráficamente los índices obtenidos a partir del ensemble de las simulaciones de los tres modelos WRF, correspondientes al píxel más cercano a las estaciones de AEMet, frente a los índices de sequías obtenidos con los datos observados. En promedio, las pendientes de los 4 intervalos de altitud analizados, varían entre 0.61 y 0.96 (en el caso ideal, la pendiente es 1.00) para el índice SPI-3. Y para el SPI-12 varían entre 0.68 y 1.1, con un coeficiente de correlación de Pearson superior 0.98, en ambos casos.

3.2 Proyecciones de las sequías a finales del Siglo XXI

Los cambios proyectados en las sequías se evaluaron mediante la comparación de las proyecciones del ensemble de los tres modelos a finales de siglo (2079-2099) respecto al periodo de referencia 1981-2009, para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. Estos cambios se evaluaron en términos de duración, frecuencia y severidad, considerando un evento de sequía extrema cuando el índice toma valores inferiores a -2. La duración se define como el número consecutivo de meses de un evento extremo de sequía, la frecuencia corresponde con el número de eventos extremos durante todo el período de estudio (2070-2099) y la severidad indica la magnitud de cada evento. Las Fig.2 y Fig.3 muestran los cambios proyectados para el índice SPI-3 y 12, respectivamente. Las áreas sombreadas indican que las proyecciones de los tres modelos WRF presentan el mismo sentido de cambio.

En general, los resultados muestran un aumento en la duración, frecuencia y severidad de los eventos extremos de sequía a finales de siglo para el índice SPI-3 y el SPI-12, en ambos escenarios. Los eventos de sequías proyectados presentan una mayor frecuencia en el caso del SPI-3. Sin embargo, los eventos obtenidos con el índice SPI-12 muestran una mayor duración e intensidad. En este caso, el umbral de sequía extrema disminuye, respecto al periodo de referencia, de 14.2 a 13.5 mm/año en el intervalo altitudinal de 0-400 m, de 26.9 a 11,4 mm/año en el intervalo de 400-1100 m, de 32.6 a 11.4 mm/año en el intervalo 1100-2100 m, y de 11.7 a 3.4 mm/año en elevaciones superiores a 2100 m, para el escenario RCP4.5. Para el escenario RCP8.5, la disminución del umbral de sequía extrema es mayor: en el intervalo altitudinal de 0-400 m disminuye a 11.1 mm/año; en el intervalo de 400-1100 m a 5.3 mm/año; en el intervalo de 1100-2100 a 3.6; y en alturas superiores a 2100 m a 0.5.

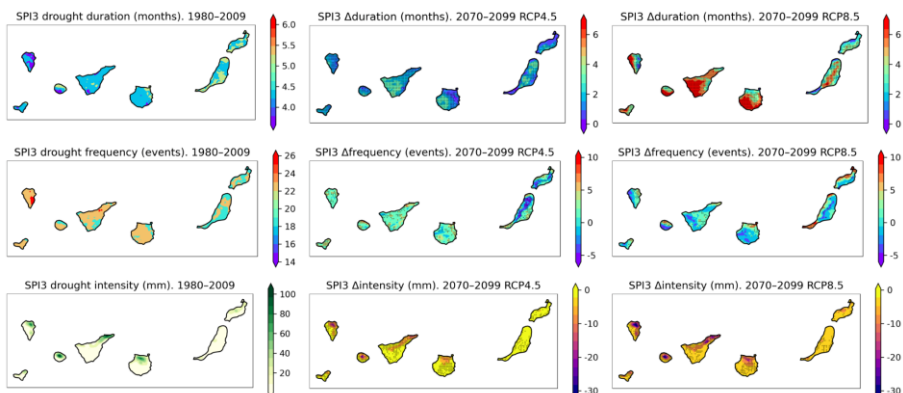


Fig. 1: Frecuencia (1^{ra} fila), duración (2^{da} fila) y severidad (3^{ra} fila) de las sequías para el periodo de referencia 1981-2009 (1^{ra} columna) para el índice SPI para el acumulado de 3 meses. Cambios en la frecuencia, duración y severidad de los eventos de sequía extrema para el futuro (2077-2099), correspondientes a los escenarios RCP4.5 (2^{da} columna) y RCP8.5 (3^{ra} columna).

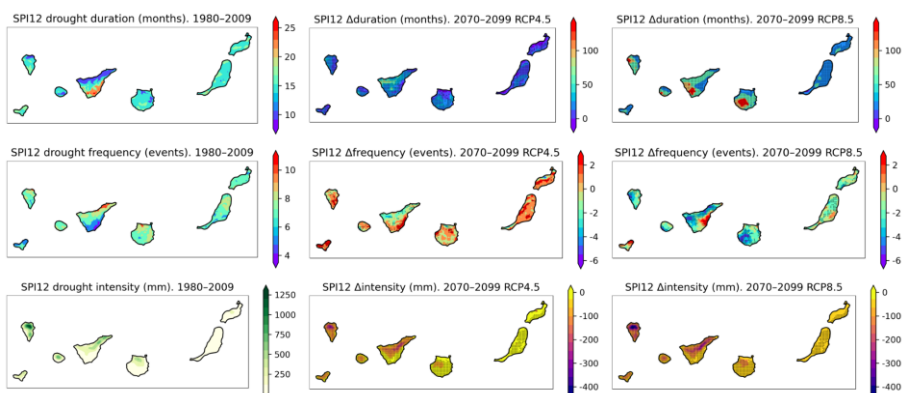


Fig. 2: Igual que la Fig. 2 para el índice SPI para el acumulado de 12 meses.

3.3. Proyecciones de la aridez a finales del Siglo XXI

El índice ACI, al igual que el índice SPI, se obtuvo con las proyecciones del ensemble de los tres modelos a finales de siglo (2079-2099), respecto al periodo de referencia 1981-2009, para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 y para los 4 intervalos de altitud analizados en este trabajo. La Fig. 3 muestra los histogramas, por intervalos altitudinales, del índice ACI y la variación espacial para los dos escenarios RCPs.

Se obtiene un incremento de aridez a finales de siglo y un patrón espacial similar para ambos escenarios, siendo más acentuado en el caso del RCP8.5. El índice ACI toma valores comprendidos entre 1 y 3 para el escenario RCP4.5, y entre 1 y 5 para el escenario RCP8.5. Asimismo, los valores más altos del índice ACI se localizan a mayor altura.

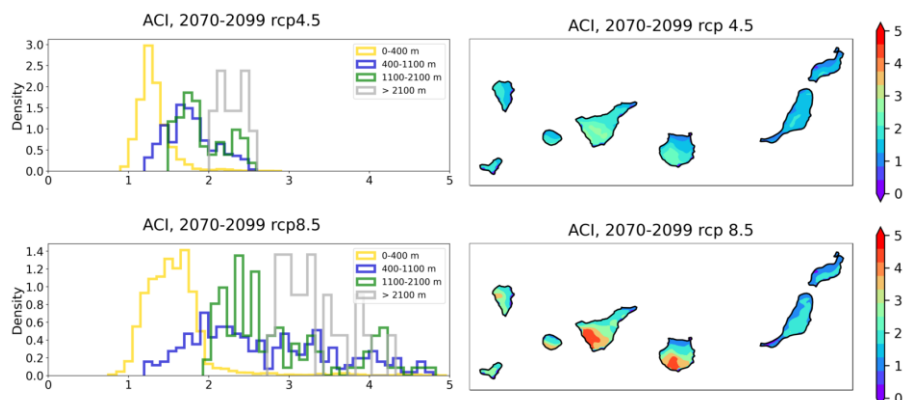


Fig. 3: El cambio en el índice de aridez (ACI) para el periodo 2070-2099 para los escenarios RCP4.5 (1^{ra} fila) y RCP8.5 (2^{da} fila). La primera columna muestra el índice ACI mediante histograma, y en la segunda columna se muestra el índice ACI espacialmente.

4. CONCLUSIONES

En este estudio se han analizado los impactos del cambio climático sobre las futuras sequías y aridez. El índice utilizado para analizar las futuras sequías es el índice estandarizado de precipitación (SPI) para los acumulados de 3 y 12 meses, y la aridez se ha evaluado con el índice de cambio de aridez. A partir de los resultados obtenidos podemos destacar: que los eventos de sequías extremas aumentarán en el periodo 2070-2099 para los escenarios RCP 4.5 y RCP8.5, disminuyendo el umbral de sequía extrema. La aridez también sufrirá un incremento a finales de siglo, siendo mayor con la altura.

Estos resultados serán ampliados con estudios que consideren otros índices de sequía, y para otras regiones con una orografía similar a las Islas Canarias.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se ha realizado en el marco del proyecto VidDATA (RTC2019-006948-7), cofinanciado por el Programa Estatal de I+D+i Orientada a los Retos de la Sociedad del Ministerio de Ciencia e Innovación, España. Los autores agradecen a la AEMet por la cesión de datos observacionales y al grupo de trabajo “World Climate Research Programme’s Working Group on Coupled Modelling”, responsable del CMIP. Agradecemos 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).

REFERENCIAS

- Beguera, S., Vicente-Serrano, S. M., Reig, F. y Latorre, B. (2014). Standardized precipitation evapotranspiration index (spei) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *Int. journal climatology* 34, 3001–3023, doi: <https://doi.org/10.1002/joc.3887>.
- Chen, F., J. Dudhia, 2001. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part II: Preliminary model validation. *Monthly Weather Review* 129, 587-604.
doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2)
- Collins, W. D., Rasch, P. J., Boville, B. A., Hack, J. J., McCaa, J. R., Williamson, D. L., Briegleb, B. P., Bitz, C. M., Lin, S., & Zhang, M. (2006). The Formulation and Atmospheric Simulation of the Community Atmosphere Model Version 3 (CAM3), *Journal of Climate*, 19(11), 2144-2161. doi: <https://doi.org/10.1175/JCLI3760.1>
- Dai, A.G. (2012). Drought under global warming: a review. *Wiley Interdiscip. Rev.–Clim. Change* 3 (6), 617.
- 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. Fichefet, 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: <https://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: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00150.1>
- Edwards, D.C. y McKee, T.B. (1997). Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. *Climatology Report N°97-2*. Colorado SAte Univ., Fort Collins, CO.
- Hong, S., Y. Noh, J. Dudhia, 2006. A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes. *Monthly Weather Review* 134, 2318–2341 American Meteorological Society. doi: <https://doi.org/10.1175/MWR3199.1>
- Kain, J.S., J.M. Fritsch, 1990. A one-dimensional entraining detraining plume model and its application in convective parameterization. *Journal of the Atmospheric Sciences* 47, 2784-2802.
doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1990\)047<2784:AODEPM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1990)047<2784:AODEPM>2.0.CO;2)
- Karnauskas, K.B., Donnelly, J.P. y Anchukaitis, K. J. (2016). Future freshwater stress for island populations. *Nat. Clim. Chang.* 6, 720–725.

- Lim, K.S.S., S.Y. Hong, 2010. Development of an Effective Double-Moment Cloud Microphysics Scheme with Prognostic Cloud Condensation Nuclei (CCN) for Weather and Climate Models. *Monthly Weather Review* 138, 1587-1612. doi: <https://doi.org/10.1175/2009MWR2968.1>
- MAPAMA (2016). Impactos del cambio climático en los procesos de desertificación en España. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Folleto. En línea. pdf.
- McKee, T.B., Doesken, N.J. y Kleist, N. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. En: *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17–22 January, Anaheim, CA. American Meteorological Society: Boston, MA; 179-184
- Morales Gil, A.; Olcina Cantos, J. y Rico Amorós, A.M. (2000). Diferentes percepciones de la sequía en España: adaptación, catastrofismo e intentos de corrección. *Investigaciones Geográficas*, Instituto Universitario de Geografía, Universidad de Alicante, 22, pp. 5-46.
- 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: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00458.1>
- 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: <https://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: <https://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: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
- Van Loon, A.F., et al., (2016). Drought in a human-modified world: reframing drought definitions, understanding, and analysis approaches. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 20 (9), 3631–3650. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-20-3631-2016>.
- 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: <https://doi.org/10.5194/gmd-4-845-2011>
- Wilhite, D.A. (2000). Drought as a natural hazard. In D. A. Wilhite (Ed.), *Drought. A Global Assessment*, vol. I (pp. 1– 18). London: Routledge.
- Wilhite, D.A. y Glantz, M.H. (1985). Understanding: the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water international*, 10, 111-120.
- World Meteorological Organization, 2012: *Standardized Precipitation Index User Guide* (M. Svoboda, M. Hayes and D. Wood). (WMO-No. 1090), Geneva.