



Resumen de la metodología para las variables climáticas en SICMA-Canarias

31/01/2025



Este proyecto ha recibido financiación del programa de acción para la innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea en virtud del acuerdo de subvención 101037424.

Índice

1. Observaciones meteorológicas y análisis del clima.....	2
1.1. Información meteorológica recopilada.....	2
1.1.1. Observaciones meteorológicas.....	2
<i>La Palma</i>	4
<i>El Hierro</i>	5
<i>La Gomera</i>	6
<i>Tenerife</i>	7
<i>Gran Canaria</i>	8
<i>Fuerteventura y Lobos</i>	9
<i>Lanzarote y Archipiélago Chinijo</i>	10
1.2. Información climática y espacial.....	11
1.2.1. Información climática del SIG.....	11
1.2.2. Reanálisis climático.....	13
1.2.3. Los modelos del sistema terrestre AR6 y CMIP6 del IPCC.....	14
2. Proyecciones climáticas.....	17
2.1. Clima histórico de las Islas Canarias.....	17
2.2. Proyecciones climáticas. Estrategia de ensemble.....	19
2.3. Reducción de escala estadística. Metodología FICLIMA.....	20
3. Indicadores climáticos y variables derivadas.....	23
3.1. Definición y metodología.....	23
3.1.1. Olas de calor.....	23
3.1.2. Evapotranspiración potencial (ET _o).....	25
3.1.3. Balance hídrico (BH).....	27
3.1.4. Evapotranspiración real (ET _r).....	28
3.1.5. Índice de aridez (IA).....	28
3.1.6. Índice normalizado de precipitación y evapotranspiración (SPEI).....	29
4. Referencias.....	30

Los trabajos que han tenido lugar durante el desarrollo del proyecto SICMA-Canarias han utilizado y necesitado diferentes tipos de datos de entrada, así como han seguido determinados enfoques metodológicos en función de la variable o isla. Este documento proporciona una guía y explicación de las principales cuestiones y dudas que la consulta de la plataforma puede producir.

1. Observaciones meteorológicas y análisis del clima

El trabajo que se ha llevado a cabo para obtener proyecciones climáticas futuras como salida necesita alimentarse de un conjunto múltiple de datos en función de las necesidades de la metodología de downscaling que se haya aplicado. En esta sección se resumirá esta información de entrada en función de la escala temporal que abarque y de la finalidad a la que haya servido. Principalmente, se consideran dos tipos de datos, los que cubren o estudian el clima histórico, y los que se utilizan para atisbar cómo afectará el cambio climático al clima pasado hacia el futuro.

Para analizar y comprender de dónde venimos, es necesario estudiar y reconocer cómo ha sido el clima en el pasado y en la actualidad. El objetivo principal es caracterizar el clima del pasado y establecer cómo era cuando se diseñaron y construyeron la mayoría de las infraestructuras y servicios actuales, para qué fueron diseñados. Esta línea de base climática es la que se toma como punto de comparación, establecido a partir de donde los modelos climáticos detienen su experimento histórico, fijándose en los años 1985-2014. Además, en la ciencia del clima, se considera que 30 años representan el estado climático medio para suavizar la variabilidad a corto plazo, tal y como lo define la Organización Meteorológica Mundial (OMM¹).

La información del pasado, obtenida mediante observaciones y datos de reanálisis, se utiliza con fines de verificación, comprobando al contrastarla con simulaciones históricas cómo se comportan los modelos climáticos, pero también para alimentar los procedimientos estadísticos de reducción de escala. Hay dos fuentes principales: las observaciones meteorológicas y la información climática.

1.1. Información meteorológica recopilada

1.1.1. Observaciones meteorológicas

Como base para los datos puntuales locales, se recopilaron las observaciones de superficie disponibles para todas las Islas Canarias. Esto supuso la creación de una base de datos exhaustiva con observaciones meteorológicas de larga duración (idealmente 30 años, o a efectos de verificación, al menos 2.000 registros), gracias a la colaboración y las políticas de libre acceso de diferentes entidades insulares, regionales y nacionales. Tras una estrecha colaboración de algunas de estas entidades a efectos de SICMA-Canarias, los datos observados se recuperaron en general de cuatro fuentes distintas. Estas fuentes incluyen:

- *Agencia Estatal de Meteorología (AEMet):*
- Instituciones del Cabildo, gobiernos locales insulares, a través de sus respectivos Consejos del Agua.
- Gobierno de España y Canarias a través del SiAR (*Sistema de Información Agroclimática para el Regadío*).
- *Parques Nacionales*

¹ <https://community.wmo.int/en/wmo-climatological-normals>

Para garantizar la calidad de los datos, los datos observados se sometieron a una evaluación y un tratamiento exhaustivos, con pruebas para detectar inhomogeneidades, valores atípicos, anomalías o cambios de tendencia, descartando las entradas que no cumplieran los requisitos mínimos de calidad. El resultado es una base de datos observados de alta calidad para las zonas de estudio en las que se pudo recoger información observada.

A continuación se ofrece un resumen de las estaciones resultantes que superaron la comprobación para cada isla por separado, con un detalle de su número, ubicación y fuente respectiva.

Es necesario explicar que, en primer lugar, se realiza un control de calidad y homogeneización (Monjo et al., 2013) para evaluar la calidad de la observación; justo después, **solo las estaciones que tienen un mínimo de 2.000 valores (~ 5 años) se toman como útiles** para continuar el proceso de modelización. Este cambio y los pasos se detallan en las tablas explicativas.



Figura 1. Resumen visual de la distribución de las estaciones meteorológicas en el archipiélago para los registros de temperatura.

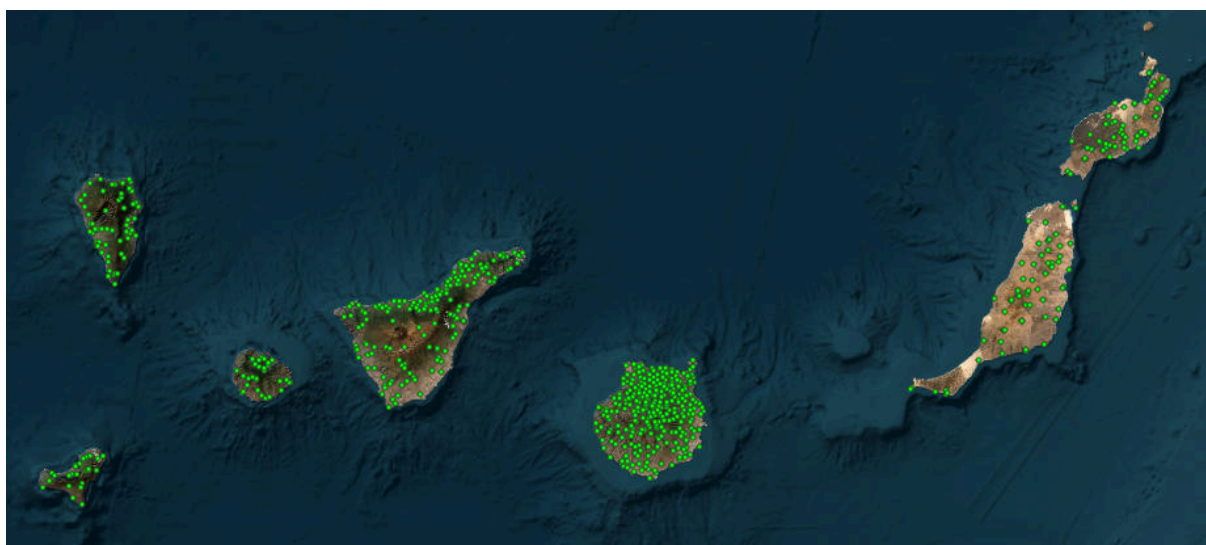


Figura 2. Resumen visual de la distribución de las estaciones meteorológicas en el archipiélago para los registros de precipitaciones.

La Palma

Para la isla de La Palma se dispone de varias fuentes de información ya que en esta zona, como en todas las Islas Canarias, existen diferentes entidades a escala insular, archipelágica y nacional que colaboran en la vigilancia meteorológica. Las cuatro fuentes de datos identificadas (AEMet, SiAR, Cabildo y Parques Nacionales) estaban disponibles para la consulta y recuperación de información, con una densidad decente en latitudes bajas y medias, pero son escasos los datos localizados en las cumbres de la isla.

En el cuadro 1 se presenta un resumen de las estaciones disponibles y finales y de las fuentes de datos. Cabe señalar que el número final de estaciones útiles que figura en dicho cuadro se calcula una vez superadas todas las pruebas de calidad.

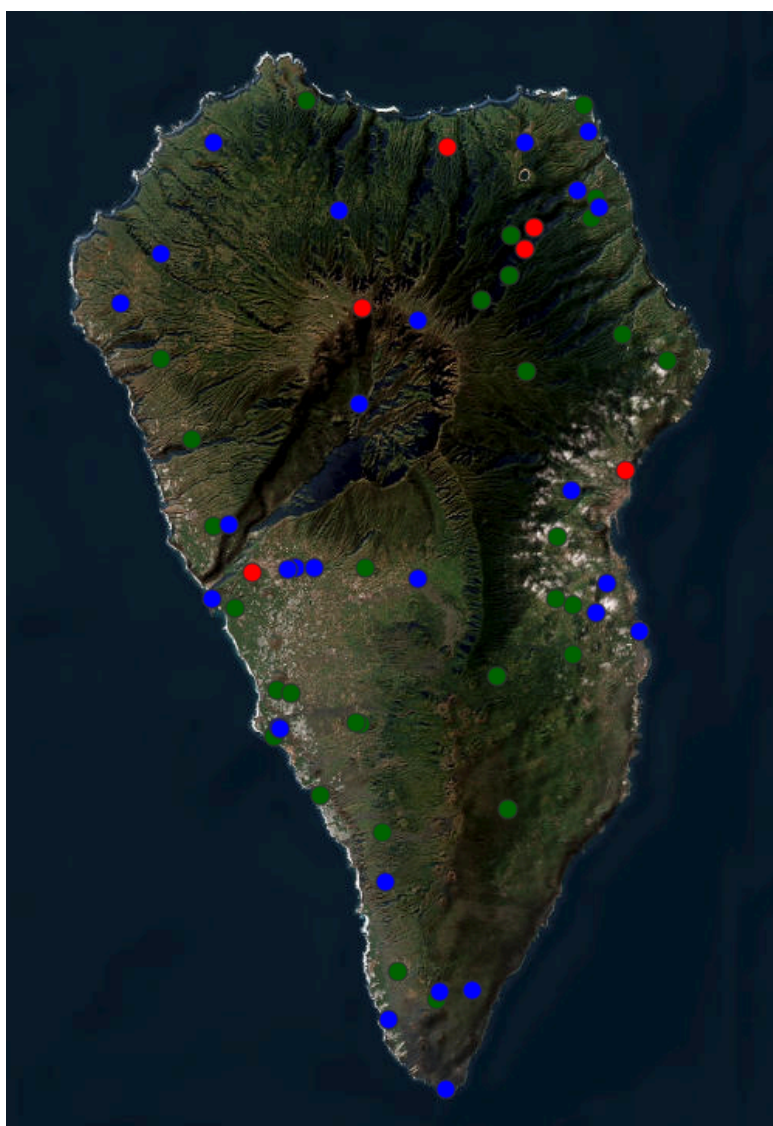


Figura 3. Distribución de las estaciones meteorológicas de La Palma para aquellas que proporcionan datos sobre precipitación (verde), temperatura (rojo) o ambas variables (azul).

Tabla 1. Estaciones recuperadas para las variables meteorológicas a estudiar para la isla de La Palma. Se muestra el nombre de la variable, el número original de estaciones proporcionadas, el número final de estaciones útiles y la fuente de datos.

Variable	Estaciones provistas	Estaciones de calidad	Número de estaciones útiles	Fuente
Precipitación	59	50	45	AEMet
Precipitación	14	14	1	Cabildo de La Palma
Precipitación	7	7	6	SiAR - Gobierno de Canarias
Precipitación	1	0	0	Parques Nacionales
TOTAL	81	71	52	
Temperatura	33	27	27	AEMet
Temperatura	14	14	1	Cabildo de La Palma
Temperatura	7	6	5	SiAR - Gobierno de Canarias
Temperatura	1	0	0	Parques Nacionales
TOTAL	55	47	33	

El Hierro

Para la isla de El Hierro también había una buena disponibilidad de datos de la AEMet, el Cabildo y el Gobierno. Los datos del Cabildo, a pesar de su gran calidad, no tenían suficiente longitud para ser incluidos en el análisis (serie iniciada en 2020), por lo que tuvieron que ser descartados.

En el cuadro 2 figura un resumen de las estaciones disponibles y finales y de las fuentes de datos. Cabe señalar que el número final de estaciones útiles que figura en dicho cuadro se calcula una vez superadas todas las pruebas de calidad.

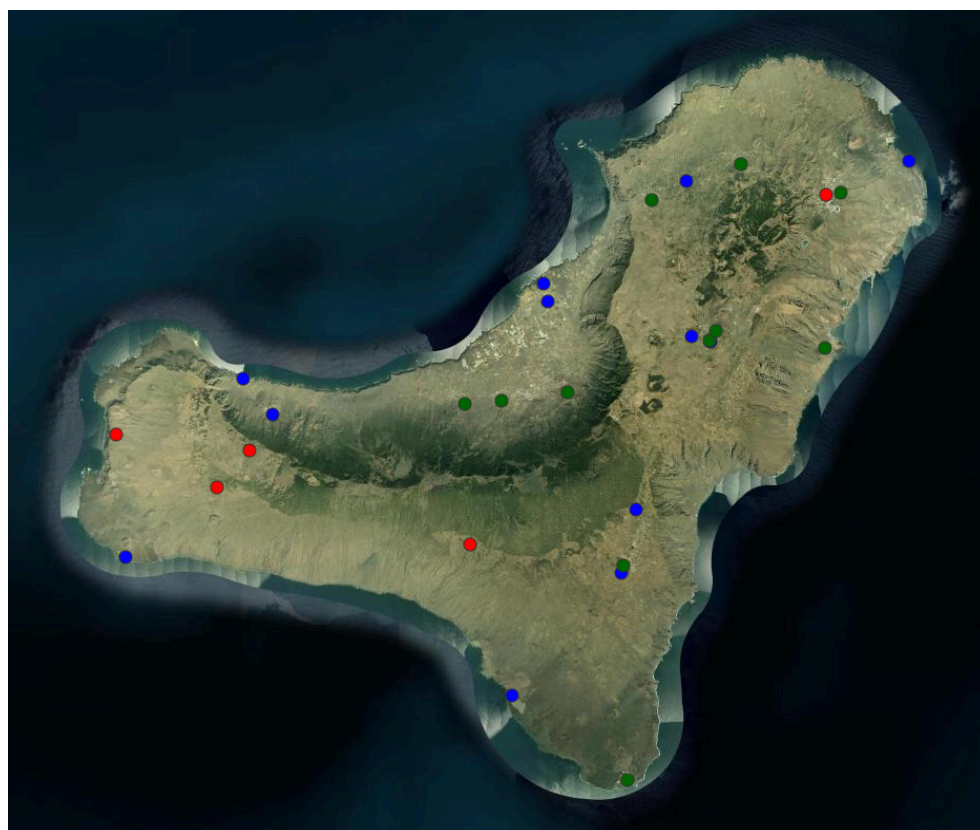


Figura 4. Distribución de las estaciones meteorológicas de El Hierro para aquellas que proporcionan datos sobre precipitación (verde), temperatura (rojo) o ambas variables (azul).

Tabla 2. Estaciones recuperadas para las variables meteorológicas a estudiar para la isla de El Hierro. Se muestra el nombre de la variable, el número original de estaciones proporcionadas, el número final de estaciones útiles y la fuente de datos.

Variable	Estaciones provistas	Estaciones de calidad	Número de estaciones útiles	Fuente
Precipitación	35	25	22	AEMet
Precipitación	17	17	0	Cabildo de El Hierro
Precipitación	1	1	1	SiAR - Gobierno de Canarias
TOTAL	53	43	23	
Temperatura	18	16	16	AEMet
Temperatura	17	17	0	Cabildo de El Hierro
Temperatura	1	1	1	SiAR - Gobierno de Canarias
TOTAL	36	34	17	

La Gomera

Para la isla de La Gomera la disponibilidad de datos era más restringida, ya que no se disponía de datos fiables del Cabildo, ni Parques Nacionales compartía sus datos en Garajonay.

En el cuadro 3 se presenta un resumen de las estaciones disponibles y finales y de las fuentes de datos. Cabe señalar que el número final de estaciones útiles que figura en dicho cuadro se calcula una vez superadas todas las pruebas de calidad.

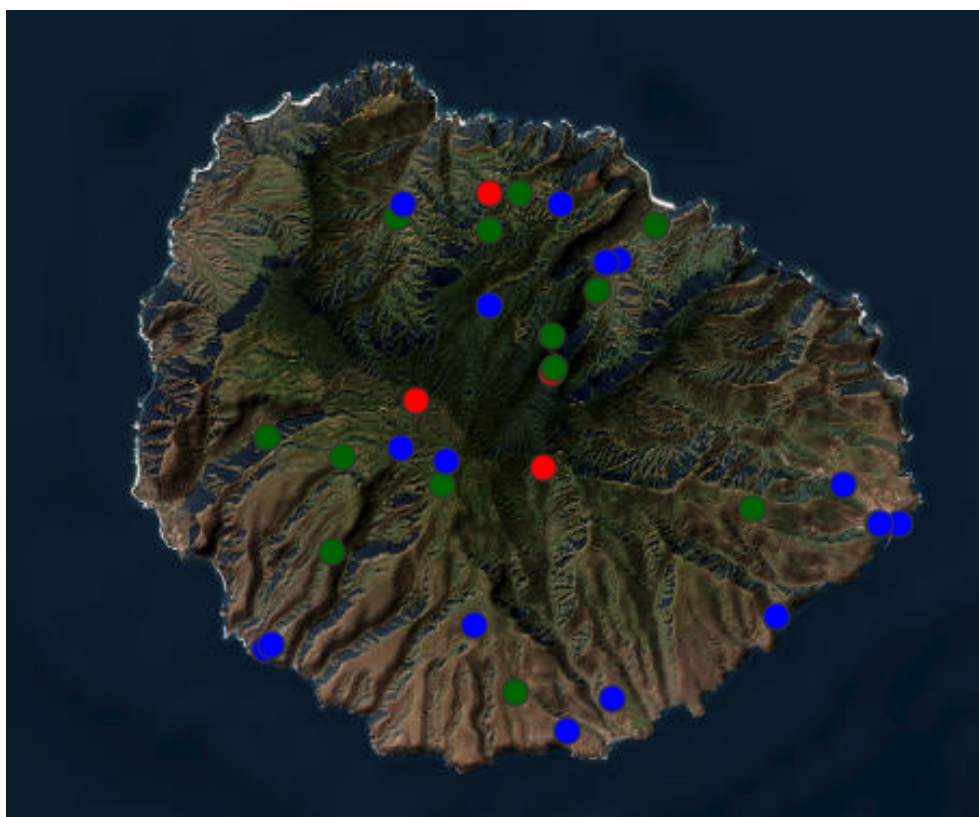


Figura 5. Distribución de las estaciones meteorológicas de La Gomera para aquellas que proporcionan datos sobre precipitación (verde), temperatura (rojo) o ambas variables (azul).

Tabla 3. Estaciones recuperadas para las variables meteorológicas a estudiar para la isla de La Gomera. Se muestra el nombre de la variable, el número original de estaciones proporcionadas, el número final de estaciones útiles y la fuente de datos.

Variable	Estaciones provistas	Estaciones de calidad	Número de estaciones útiles	Fuente
Precipitación	38	30	28	AEMet
Precipitación	2	2	2	SiAR - Gobierno de Canarias
TOTAL	40	32	30	
Temperatura	23	18	18	AEMet
Temperatura	2	2	2	SiAR - Gobierno de Canarias
TOTAL	25	20	20	

Tenerife

En el caso de la isla de Tenerife, la disponibilidad de datos era amplia y de fácil acceso. Además de la AEMet y el Gobierno, con una buena densidad en toda la isla, se obtuvieron datos de Agrocabildo que cubrían todas las variables a través de consulta API, y también se compartieron con el proyecto estaciones del Parque Nacional del Teide.

En el cuadro 4 se presenta un resumen de las estaciones disponibles y finales y de las fuentes de datos. Cabe señalar que el número final de estaciones útiles que figura en dicho cuadro se calcula una vez superadas todas las pruebas de calidad.

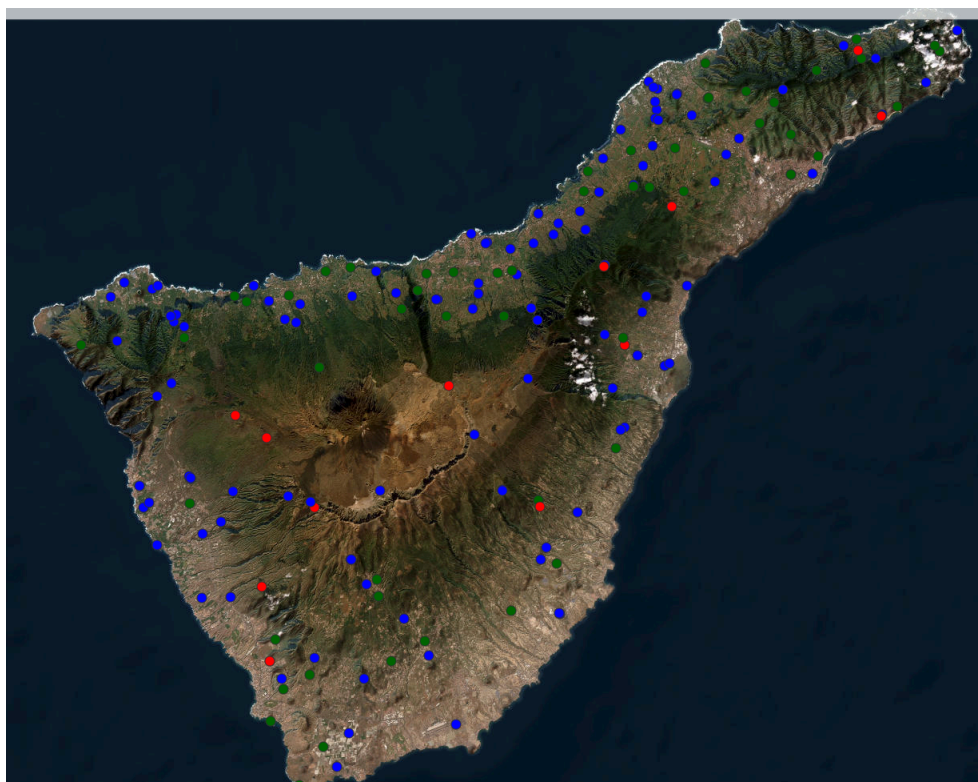


Figura 6. Distribución de las estaciones meteorológicas de Tenerife para las que proporcionan datos sobre precipitación (verde), temperatura (rojo) o ambas variables (azul).

Tabla 4. Estaciones recuperadas para las variables meteorológicas a estudiar para la isla de Tenerife. Se muestra el nombre de la variable, el número original de estaciones proporcionadas, el número final de estaciones útiles y la fuente de datos.

Variable	Estaciones provistas	Estaciones de calidad	Número de estaciones útiles	Fuente
Precipitación	153	133	115	AEMet
Precipitación	56	56	54	Cabildo de Tenerife
Precipitación	11	11	11	SiAR - Gobierno de Canarias
Precipitación	2	2	2	Parques Nacionales
TOTAL	222	202	182	
Temperatura	90	73	73	AEMet
Temperatura	56	56	54	Cabildo de Tenerife
Temperatura	11	11	11	SiAR - Gobierno de Canarias
Temperatura	2	2	2	Parques Nacionales
TOTAL	159	142	140	

Gran Canaria

La isla de Gran Canaria es la que dispone de más datos para el uso del proyecto. Los datos de la AEMet y del Gobierno español estaban disponibles para el proyecto, con una buena densidad para ambas variables; por otra parte, el Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria compartió un inmenso conjunto de datos de sus registros de precipitaciones a largo plazo que cubren toda la isla con una densidad asombrosa. En Gran Canaria no hay ningún Parque Nacional.

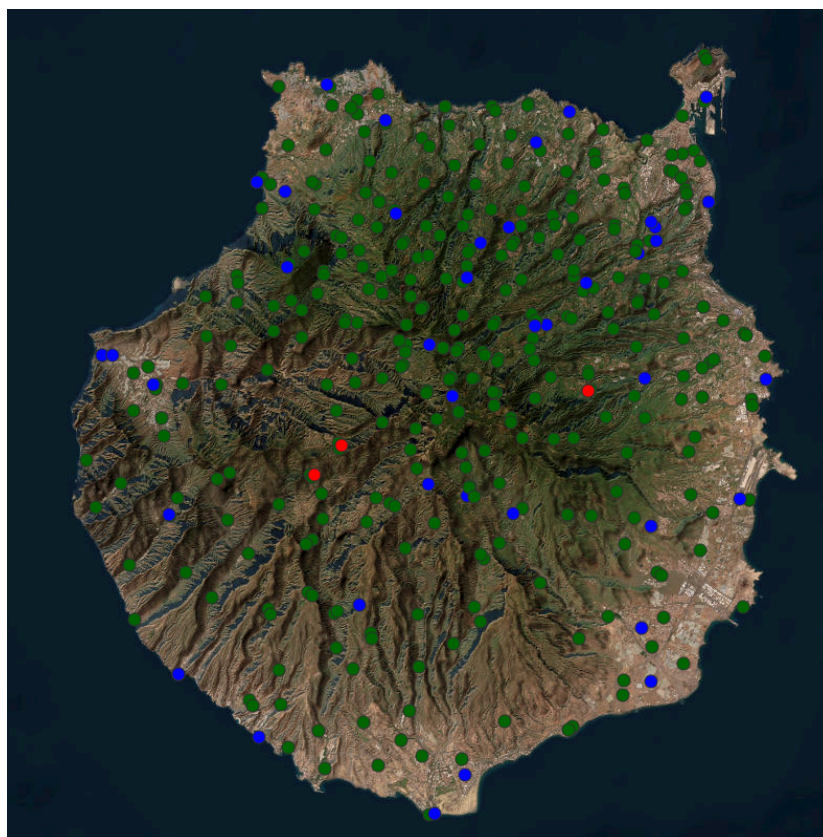


Figura 7. Distribución de las estaciones meteorológicas de Gran Canaria para aquellas que proporcionan datos sobre precipitación (verde), temperatura (rojo) o ambas variables (azul).

En el cuadro 5 se presenta un resumen de las estaciones disponibles y finales y de las fuentes de datos. Cabe señalar que el número final de estaciones útiles que figura en dicho cuadro se calcula una vez superadas todas las pruebas de calidad.

Tabla 5. Estaciones recuperadas para las variables meteorológicas a estudiar para la isla de Gran Canaria. Se muestra el nombre de la variable, el número original de estaciones proporcionadas, el número final de estaciones útiles y la fuente de datos.

Variable	Estaciones provistas	Estaciones de calidad	Número de estaciones útiles	Fuente
Precipitación	153	126	115	AEMet
Precipitación	270	270	252	Cabildo de Gran Canaria
Precipitación	6	6	5	SiAR - Gobierno de Canarias
TOTAL	429	402	372	
Temperatura	46	39	39	AEMet
Temperatura	6	6	5	SiAR - Gobierno de Canarias
TOTAL	52	45	45	

Fuerteventura y Lobos

Para la isla de Fuerteventura, la disponibilidad de datos fue buena, aunque es el único lugar del que podría decirse que carece de una buena densidad de observaciones teniendo en cuenta su tamaño (la segunda más grande), especialmente para los registros de temperatura, quedando la mayor parte de la costa occidental de la isla vacía de datos. Se recuperaron estaciones de AEMet, que sólo constaban de 8 estaciones para la temperatura. El Consejo Insular de Aguas de Fuerteventura compartió con el proyecto sus datos históricos de precipitaciones, ayudando a poblar la base de datos. Sólo 2 estaciones del Gobierno estaban disponibles. No existe Parque Nacional en la isla.

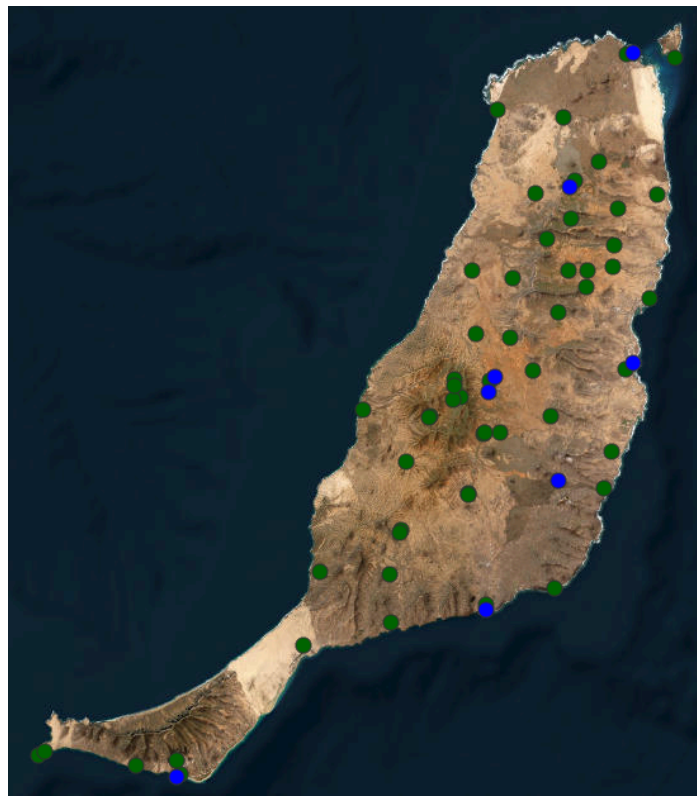


Figura 8. Distribución de las estaciones meteorológicas de Fuerteventura y Lobos para las que proporcionan datos sobre precipitación (verde), temperatura (rojo) o ambas variables (azul).

En el cuadro 6 figura un resumen de las estaciones disponibles y finales y de las fuentes de datos. Cabe señalar que el número final de estaciones útiles que figura en dicho cuadro se calcula una vez superadas todas las pruebas de calidad.

Tabla 6. Estaciones recuperadas para las variables meteorológicas a estudiar para las islas de Fuerteventura y Lobos. Se muestra el nombre de la variable, el número original de estaciones proporcionadas, el número final de estaciones útiles y la fuente de datos.

Variable	Estaciones provistas	Estaciones de calidad	Número de estaciones útiles	Fuente
Precipitación	20	16	16	AEMet
Precipitación	48	48	44	Cabildo de Fuerteventura
Precipitación	2	2	2	SiAR - Gobierno de Canarias
TOTAL	70	66	62	
Temperatura	8	6	6	AEMet
Temperatura	2	2	2	SiAR - Gobierno de Canarias
TOTAL	10	8	8	

Lanzarote y Archipiélago Chinijo

Para la isla de Lanzarote y el Archipiélago Chinijo, la disponibilidad de datos fue notable, sobre todo en densidad teniendo en cuenta su relativo tamaño medio. Se recuperaron estaciones de AEMet, del Cabildo y del sistema SiAR. Los datos del Parque Nacional de Timanfaya no estaban disponibles en este caso.

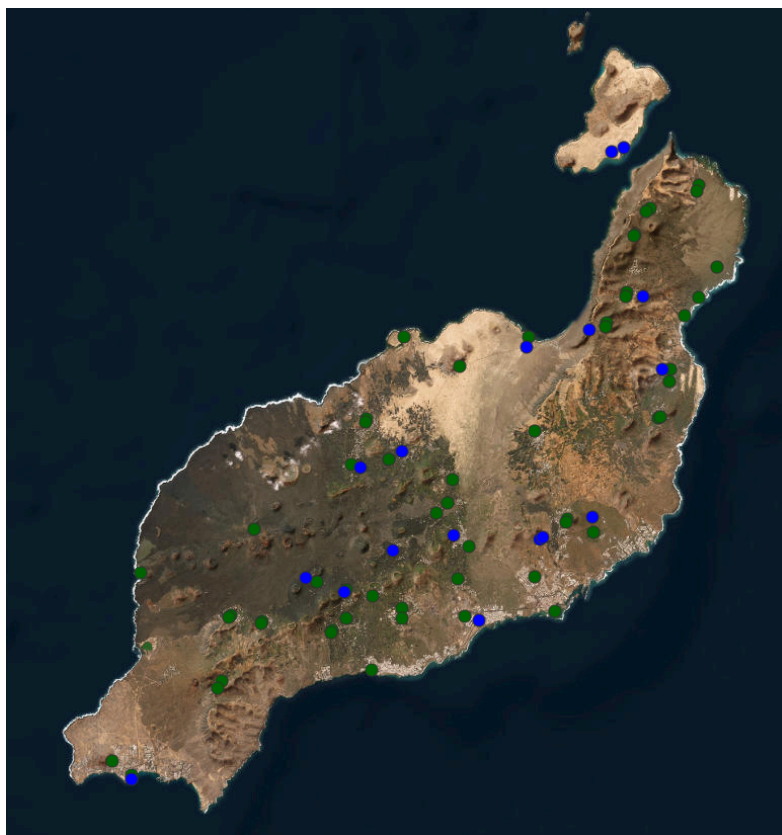


Figura 9. Distribución de las estaciones meteorológicas de Lanzarote y el Archipiélago Chinijo para aquellas que proporcionan datos sobre precipitación (verde), temperatura (rojo) o ambas variables (azul).

En el cuadro 7 figura un resumen de las estaciones disponibles y finales y de las fuentes de datos. Cabe señalar que el número final de estaciones útiles que figura en dicho cuadro se calcula una vez superadas todas las pruebas de calidad.

Tabla 7. Estaciones recuperadas para las variables meteorológicas a estudiar para la isla de Lanzarote y el Archipiélago Chinijo. Se muestra el nombre de la variable, el número original de estaciones proporcionadas, el número final de estaciones útiles y la fuente de datos.

Variable	Estaciones provistas	Estaciones de calidad	Número de estaciones útiles	Fuente
Precipitación	35	34	34	AEMet
Precipitación	33	33	33	Cabildo de Lanzarote
Precipitación	7	7	5	SiAR - Gobierno de Canarias
TOTAL	75	74	72	
Temperatura	12	12	12	AEMet
Temperatura	7	7	5	SiAR - Gobierno de Canarias
TOTAL	19	19	17	

1.2. Información climática y espacial

Como fuente de información complementaria de las observaciones meteorológicas, la información espacial viene a cubrir las lagunas de cómo era (y será) el tiempo y el clima en los lugares donde no se dispone de observaciones meteorológicas. Podría decirse que esta información proporciona datos con una cobertura espacial que permite procesar y gestionar datos en todo el archipiélago. En este sentido, podríamos distinguir entre información estática SIG, reanálisis y modelos climáticos.

1.2.1. Información climática del SIG

SICMA-Canarias tiene como objetivo producir proyecciones climáticas locales que cubran la totalidad de las Islas Canarias con una resolución fina de 100x100 m. Para lograr este propósito es necesario contar con diferentes capas de datos que permitan la adecuada gestión de la información en un entorno tan intrincado y complejo como el de estas islas.

Además, también es conveniente alimentar la investigación y este tipo de desarrollos con todo lo que se ha hecho antes en la misma área, no sólo para ahorrar recursos, sino para fomentar la comunidad científica y ayudar a continuar la investigación en el campo, aparte de construir mejores resultados que impulsen el estado del arte en la materia.

En este sentido, gracias al enfoque participativo adoptado por SICMA-Canarias y al apoyo de diferentes entidades, se ha recopilado una amplia variedad de información rica y realmente útil para ayudar a cumplir los objetivos de este proyecto:

- Datos climáticos históricos del Atlas Canario del SITCAN:
La ULPGC (Universidad de las Palmas de Gran Canaria) y el Gobierno de Canarias han realizado un gran esfuerzo para crear un atlas climático del archipiélago (*Luque Söllheim, A. L., et al., 2024*). Gracias a la colaboración de los investigadores de la ULPGC, estas capas fueron compartidas para ayudar a construir mejores modelos de interpolación y bases de datos meteorológicos y climáticos para el SICMA-Canarias. Se recogieron capas como la nubosidad mensual (Figura 10), la HR mensual, la precipitación o la temperatura.

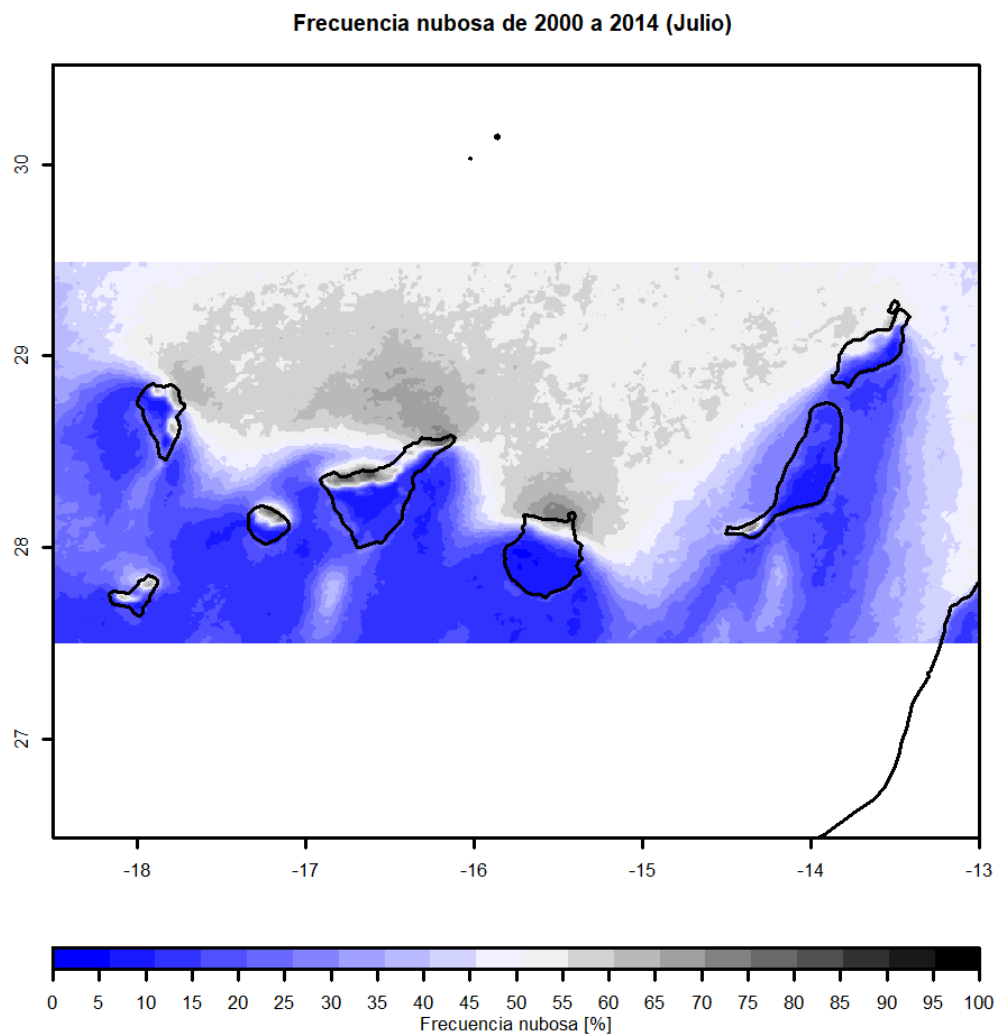


Figura 10. Ejemplo de la nubosidad media histórica en todo el archipiélago canario para el mes de julio. La leyenda muestra la frecuencia de nubosidad del cielo en %.

- [Capas de información histórica y geográfica de las propiedades físicas del archipiélago de CanaryClim:](#)

Gracias a la colaboración del Parque Nacional del Teide y sus investigadores, se identificó un proyecto que tuvo lugar en el pasado en las Islas Canarias y que proporcionó resultados realmente útiles en torno al cambio climático y los microclimas canarios. Este proyecto, denominado CanaryClim (*Patiño & Collart et al., 2023*), categorizó los comportamientos climáticos locales de cada isla, identificando un conjunto de parámetros útiles para producir un conjunto fino de capas topográficas (100 x 100 m) en localizaciones orográficamente tan complejas, como la norteñidad (*northness*, Figura 11) o la esteñidad.

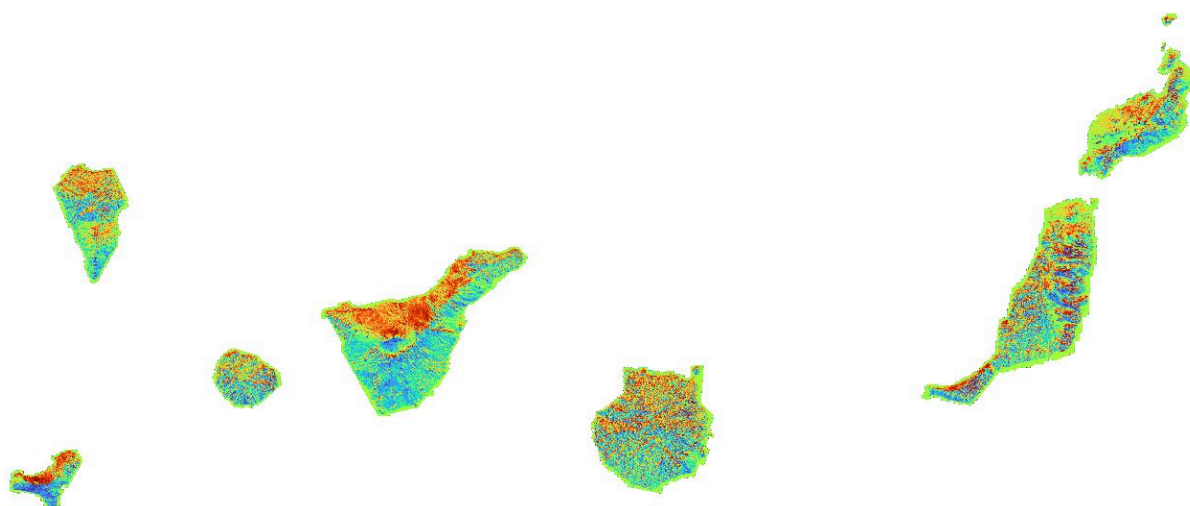


Figura 11. Ejemplo de la capa TIF "northness" que cubre todo el Archipiélago Canario a una resolución de 100 x 100 m.

- Diferentes capas SIG de uso:
Otras capas SIG necesarias para interpolaciones o análisis espaciales se recogieron de fuentes públicas. Estas capas comprenden información como DEM, Aspecto, Orientación, u otras más técnicas como NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) o capas LST (Land Surface Temperature).

1.2.2. Reanálisis climático

Hay casos en los que la distribución espacial o la cobertura temporal de las estaciones meteorológicas es inadecuada, dando lugar a inhomogeneidades, y no tienen por qué representar su entorno. SICMA-Canarias optó por utilizar también datos de reanálisis con fines de verificación, ya que ofrecen una mejor coherencia espacio-temporal y consistencia física, y también para el desarrollo de escenarios climáticos, ya que son una parte clave de los procedimientos estadísticos.

El reanálisis climático combina modelos meteorológicos numéricos con observaciones asimiladas, proporcionando representaciones numéricas y físicas de las condiciones climáticas recientes. Abarcan estimaciones de variables atmosféricas como la temperatura del aire, la presión y el viento a distintos niveles, así como variables de superficie como las precipitaciones, el contenido de humedad del suelo, la altura de las olas oceánicas y la temperatura de la superficie del mar.

Dado que las Islas Canarias a veces no tienen un tamaño lo suficientemente amplio como para considerar ERA5-Land, el principal reanálisis atmosférico elegido para el proyecto es el reanálisis europeo ERA5 para cubrir también las zonas marinas y costeras, aunque algunos campos de ERA5-Land sí son elegidos para lugares del interior. Esta selección se basa en varias consideraciones 1) es desarrollado por el Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Medio Plazo (ECMWF), cuya principal área operativa se alinea con el ámbito geográfico del Archipiélago Canario, y es reconocido por ofrecer predicciones meteorológicas de primer nivel, 2) representa la última versión del reanálisis europeo, presumiendo de una resolución espacial y temporal mejorada en comparación con sus predecesores, y 3) es de libre acceso para su descarga a través del Servicio de Cambio Climático del programa Copernicus (C3S, 2019).

ERA5-LAND 1981-2010: 30-year Return Period Event for Daily Maximum Temperature

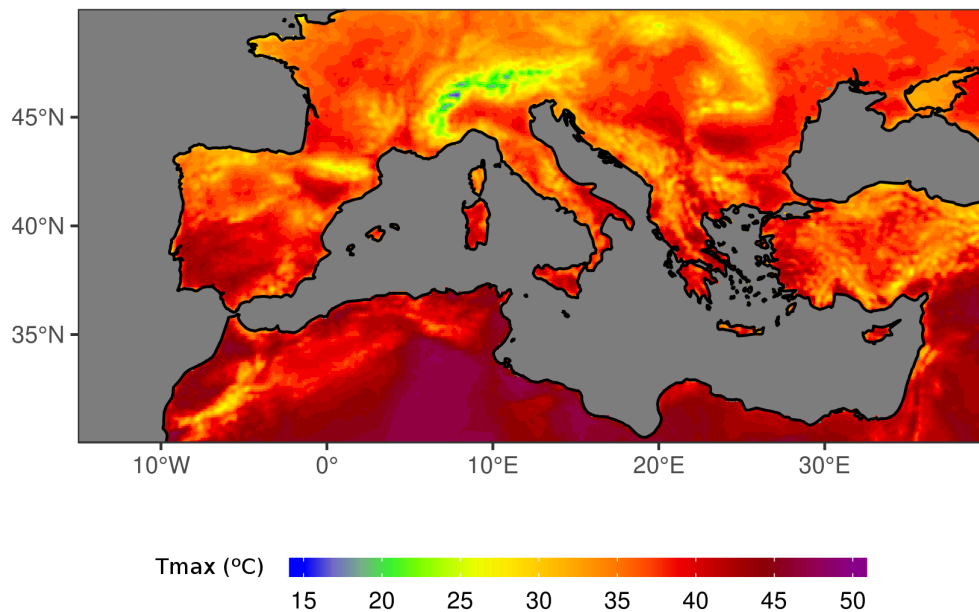


Figura 12. Ejemplo de representación espacial del reanálisis ERA5-Land, representando un evento de 30 años de periodo de retorno para la temperatura máxima diaria. (Fuente: C3S)

ERA5 es el reanálisis más reciente desarrollado por el ECMWF. Publicado en julio de 2019, proporciona datos horarios con una cobertura temporal que va desde 1950 hasta la actualidad. Cubre todo el globo con una resolución de 0,25°x0,25°; además, ERA5-Land, que solo cubre el terreno terrestre, tiene una malla de 0,1°x 0,1° de resolución espacial (9 km aprox. en latitud media).

De todas las variables disponibles para descargar, para ERA5-Land sólo se recuperaron precipitación y temperatura, mientras que para ERA5, dado que se utiliza en el método FICLIMA para el downscaling estadístico, se buscaron más capas, tales como: HR, Q, precipitación, espesor geopotencial, componentes u-v del viento, temperatura... todas ellas a diferentes alturas.

1.2.3. Los modelos del sistema terrestre AR6 y CMIP6 del IPCC

Uno de los avances más importantes que plantea SICMA-Canarias para el desarrollo de este proyecto es la alineación de la ciencia utilizada con el estado del arte. Los últimos avances en ciencia climática giran en torno al uso de los modelos CMIP6, mencionados en el AR6 del IPCC. El uso de estos modelos supone un salto en la información disponible para Canarias y un enriquecimiento en todas las futuras estrategias de adaptación y mitigación que puedan tener lugar.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) coordina los esfuerzos mundiales contra el cambio climático mediante la elaboración de informes exhaustivos sobre los riesgos climáticos inducidos por el hombre, los impactos y las estrategias de adaptación y mitigación. Su Sexto Informe de Evaluación (AR6), respaldado por destacados científicos y gobiernos, establece el estado actual de la ciencia climática. El AR6 utiliza los últimos modelos climáticos globales (GCM) del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP, *Eyring et al., 2016*), que estandariza los protocolos y resultados de los experimentos climáticos. La sexta fase del CMIP presenta avances en los Modelos del Sistema Tierra (ESM) e introduce nuevos escenarios de emisiones, abordando la evolución de las necesidades de adaptación climática y las estrategias de mitigación.

Los ESM son modelos climáticos avanzados que combinan componentes atmosféricos, terrestres, oceánicos y criosféricos, lo que permite un cálculo interactivo del CO2 atmosférico y las emisiones. Estos modelos proyectan los resultados climáticos futuros utilizando escenarios de concentración derivados de los escenarios de emisiones, que tienen en cuenta factores como el desarrollo socioeconómico y la evolución tecnológica. La CMIP6 introduce las Sendas Socioeconómicas Compartidas (SSP), un avance respecto a las Sendas de Concentración Representativas (RCP) de la CMIP5, que ofrecen narrativas sobre la evolución de la sociedad que conducen a los escenarios de emisiones. La nueva generación de modelos CMIP6 presenta una mayor sensibilidad, una mayor resolución espacial y predice impactos climáticos más graves que la CMIP5 (Masson-Delmotte et al., 2021). Por consiguiente, se recomiendan los datos de la CMIP6 para futuros estudios y evaluaciones de riesgos.

Los SSP son escenarios que proyectan cambios socioeconómicos globales hasta 2100, describiendo vías alternativas para el desarrollo humano, incluyendo políticas de mitigación, estrategias de adaptación y factores sociales como la sostenibilidad o la desigualdad económica. Estas vías influyen en el comportamiento futuro del clima. CMIP6 introduce cuatro escenarios principales de SSP: SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, y SSP5-8.5 (Nivel 1), ampliando la gama de los dos escenarios principales de CMIP5 (RCP 4.5 y RCP 8.5). La mejor comprensión del sistema climático mundial por parte de la CMIP6 permite una gama más amplia de temperaturas medias mundiales previstas en comparación con la CMIP5. Estos SSP predicen resultados de temperatura más allá del rango cubierto por los escenarios RCP anteriores (Meinshausen et al., 2019).

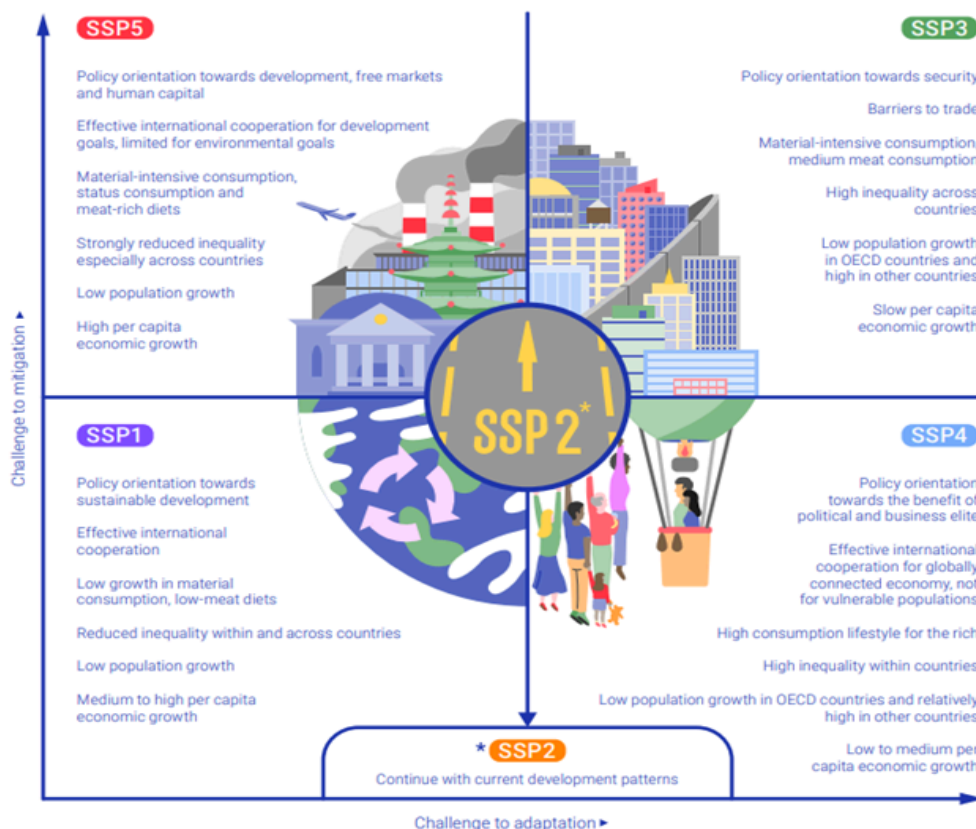


Figura 13. Vías socioeconómicas compartidas (en la figura, OCDE significa Organizaciones de Cooperación y Desarrollo Económicos). Fuente: figura adaptada de O'Neill et al., 2017.

Siguiendo recomendaciones científicas previas, la información climática de SICMA-Canarias se basa ya en los modelos CMIP6 e incorpora en su flujo de trabajo los SSP actuales. Por lo tanto, las proyecciones climáticas futuras de alta resolución presentadas muestran un conjunto de datos único.

Para realizar la mejor evaluación posible de la incertidumbre, se ha seguido un enfoque ensemble, y se han recuperado un total de 10 modelos CMIP6 diferentes (10 modelos a escala diaria nos dan información suficiente para cuantificar su incertidumbre intrínseca en la proyección de los cambios). Cada modelo tiene sus particularidades, por lo que se realizó un análisis exhaustivo de cada modelo y de la documentación disponible para seleccionar los 10 mejores para Canarias. Se consideró el mismo periodo de análisis, del 01/01/1950 al 31/12/2100 y los 4 SSP de Nivel 1 (ssp126, ssp245, ssp370 y ssp585) que van del 01/01/2015 al 31/12/2100. La relación de los modelos seleccionados se detalla en el cuadro 8:

Tabla 8. Información sobre los 10 modelos climáticos pertenecientes al 6 Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6) correspondiente al AR6 del IPCC. Los modelos se recuperaron del portal Earth System Grid Federation (ESGF) en apoyo del Programa de Diagnóstico e Intercomparación de Modelos Climáticos (PCMDI).

MODELOS CMIP6	Resolución	Centro responsable	Referencias
ACCESO-CM2	1.875° x 1.250°	Simulador Comunitario Australiano del Clima y del Sistema Terrestre (ACCESS), Australia	Bi, D. et al (2020)
BCC-CSM2-MR	1,125° x 1,121°	Centro Climático de Pekín (BCC), Administración Meteorológica China, China.	Wu T. et al. (2019)
CanESM5	2.812° x 2.790°	Centro Canadiense de Modelización y Análisis del Clima (CC-CMA), Canadá.	Swart, N.C. y otros (2019)
CMCC-ESM2	1.000° x 1.000°	Centro Mediterráneo sobre Cambios Climáticos (CMCC).	Cherchi et al, 2018
CNRM-ESM2-1	1.406° x 1.401°	CNRM (Centre National de Recherches Meteorologiques), Meteo-France, Francia.	Seferian, R. (2019)
EC-EARTH3	0,703° x 0,702°	Consorcio EC-EARTH	Consorcio CE-Tierra. (2019)
MPI-ESM1-2-HR	0,938° x 0,935°	Instituto Max-Planck de Meteorología (MPI-M), Alemania.	Müller et al., (2018)
MRI-ESM2-0	1,125° x 1,121°	Instituto de Investigación Meteorológica (MRI), Japón.	Yukimoto, S. et al. (2019)
NorESM2-MM	1,250° x 0,942°	Centro Noruego del Clima (NCC), Noruega.	Bentsen, M. et al. (2019)
UKESM1-0-LL	1.875° x 1.250°	UK Met Office, Hadley Centre, Reino Unido	Good, P. et al. (2019)

2. Proyecciones climáticas

2.1. Clima histórico de las Islas Canarias

El resultado principal y clave de SICMA-Canarias es la generación de un conjunto de proyecciones climáticas que cubran todo el archipiélago. Sin embargo, antes de comenzar esta tarea, es necesario sentar las bases de lo que se va a trabajar: analizar e identificar en detalle cómo era el clima en el pasado y cómo es en la actualidad para establecer la línea base con la que comparar los cambios futuros. También es importante recordar que el Archipiélago Canario puede estar en una zona climática bastante homogénea, pero cuando su ubicación se cruza con una topografía sobresaliente y el clima particular de la zona, surge un amplio conjunto de microclimas y comportamientos locales. Esto da cuenta de la enorme importancia de identificar primero estas características clave antes de realizar cualquier proyección climática, ya que es algo que debe tenerse en cuenta y representarse en los forzamientos que debe manejar la reducción estadística de escala.

Las Islas Canarias son conocidas por su enorme abundancia de microclimas locales, con cambios extremos en las condiciones de temperatura, nubosidad, pluviosidad y humedad en cuestión de kilómetros. Y esto sucede en múltiples planos, con notables cambios en las condiciones pedoclimáticas con la altura, orientación, situación dentro de la isla, accidentes orográficos locales... siendo prácticamente cada isla un cosmos climático en miniatura, teniendo algunas de ellas como Gran Canaria el sobrenombre de "continente en miniatura" debido a las múltiples variaciones que sufre el clima. La forma en que los vientos alisios interactúan con la orografía a lo largo del año, más el efecto de las montañas frente a los sistemas de bajas presiones o las intrusiones de polvo sahariano marcan el clima de cada isla. Por eso es obligatorio analizar en profundidad cada isla por separado para descubrir la distribución de la variabilidad climática.

Para ello, es necesario representar la distribución espacial de la temperatura y las precipitaciones en cada isla. Para esta tarea, se ha utilizado la totalidad de las observaciones meteorológicas para comprobar el clima de cada región, además de cruzar los resultados con los datos de reanálisis y también, muy importante, con el conocimiento local del clima canario. Los investigadores del SICMA-Canarias tienen una amplia experiencia, tras años de observación y seguimiento, en el clima de las islas, lo que es esencial para distinguir características climáticas realmente locales que sólo por el análisis de las observaciones meteorológicas podrían ser engañosas o erróneas, como los eventos de "*bajarradas*" (vientos Föhn secos) o la típica convergencia de vientos en lluvias.

Para llevar a cabo este análisis, se ha cruzado y considerado un conjunto múltiple de diferentes capas topográficas y climáticas, junto con observaciones meteorológicas, para analizar e identificar la mejor forma de extrapolar las condiciones climáticas locales y cubrirlas y representarlas en la geografía de cada isla. Para ello, se ha utilizado un complejo algoritmo de Regresión Ponderada Geográficamente (GWR) para generar los resultados necesarios, con cada conjunto de capas correspondiente a cada prueba. Las pruebas identificadas pueden consultarse en la Tabla 9.

Como ya se ha mencionado, cada una de las 25 pruebas se ejecutó en cada isla por separado, y para cada una de las variables climáticas identificadas de interés (temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación), con un minucioso análisis de calidad tanto mediante el uso de estadísticas para errores y correlación, como con el análisis espacial y visual de cada salida, producida a escala anual, mensual y estacional. La comprobación y validación de los resultados concluyó con la selección de las siguientes pruebas para cada isla y variable climática (Tabla 10).

Tabla 9. Información sobre las 25 pruebas diferentes que se desarrollaron en cada isla para identificar la mejor combinación de capas para representar la diversidad climática de la isla. Distcost = distancia a la orilla del mar

Prueba	Capas topográficas y climáticas utilizadas
P1	altitud, distcost, pendiente, aspecto, norte, este
P2	altitud, distcost, aspecto, norte, este
P3	altitud, aspecto, norte, este
P4	altitud, distcost, norte, este
P5	altitud, distcost, norte
P6	altitud, distcost, aspecto, norte, este, nubosidad
P7	altitud, aspecto, norte, este, nubosidad
P8	altitud, aspecto, nubosidad
P9	altitud, distcost, aspecto, nubosidad
P10	altitud, distcost, nubosidad
P11	altitud, aspecto, norte, nubosidad
P12	altitud, distcost, norte, este, nubosidad
P13	altitud, distcost, aspecto, norte, nubosidad
P14	altitud
P15	altitud, nubosidad
P16	altitud, distcost, aspecto, norte, este, nubosidad, LST, NDVI
P17	altitud, distcost, aspecto, norte, este, nubosidad, NDVI
P18	altitud, distcost, aspecto, norte, este, NDVI
P19	distcost, aspecto, norte, este, NDVI
P20	aspecto, norte, este, NDVI
P21	aspecto, norte, este, LST, NDVI
P22	aspecto, norte, este, nubosidad, NDVI
P23	norte, este, nubosidad, NDVI
P24	norte, este, nubosidad, LST, NDVI
P25	altitud, distcost, norte, este, nubosidad, LST, NDVI

Tabla 10. Información sobre los resultados de la selección de capas para la caracterización espacial de cada una de las distribuciones climáticas canarias. Distcost = distancia a la orilla del mar

Isla	Variable climática	Prueba selett.	Capas topográficas y climáticas utilizadas
La Palma	Precipitación	P25	altitud, distcost, norte, este, nubosidad, LST, NDVI
	Temperatura máxima	P6	altitud, distcost, aspecto, norte, este, nubosidad
	Temperatura mínima	P6	altitud, distcost, aspecto, norte, este, nubosidad
El Hierro	Precipitación	P7	altitud, aspecto, norte, este, nubosidad
	Temperatura máxima	P9	altitud, distcost, aspecto, nubosidad
	Temperatura mínima	P9	altitud, distcost, aspecto, nubosidad
La Gomera	Precipitación	P11	altitud, aspecto, norte, nubosidad
	Temperatura máxima	P11	altitud, aspecto, norte, nubosidad
	Temperatura mínima	P11	altitud, aspecto, norte, nubosidad
Tenerife	Precipitación	P11	altitud, aspecto, norte, nubosidad
	Temperatura máxima	P11	altitud, aspecto, norte, nubosidad
	Temperatura mínima	P11	altitud, aspecto, norte, nubosidad
Gran Canaria	Precipitación	P13	altitud, distcost, aspecto, norte, nubosidad
	Temperatura máxima	P13	altitud, distcost, aspecto, norte, nubosidad
	Temperatura mínima	P13	altitud, distcost, aspecto, norte, nubosidad

Fuerte ventura	Precipitación	P12	altitud, distcost, norte, este, nubosidad
	Temperatura máxima	P15	altitud, nubosidad
	Temperatura mínima	P15	altitud, nubosidad
Lanza de memoria	Precipitación	P8	altitud, aspecto, nubosidad
	Temperatura máxima	P12	altitud, distcost, norte, este, nubosidad
	Temperatura mínima	P12	altitud, distcost, norte, este, nubosidad

2.2. Proyecciones climáticas. Estrategia de ensemble

La generación de información climática enfrenta importantes desafíos debido a la incertidumbre inherente a los datos. Los modelos climáticos (MC) son herramientas numéricas que simulan el sistema climático, pero cada uno tiene un grado de incertidumbre dependiendo de su estructura interna. Estos modelos se basan en las propiedades físicas, químicas y biológicas de los componentes del sistema climático, lo que hace que cada simulación de estados climáticos pasados y futuros sea única. Además, el sistema climático tiene variabilidad interna debido a las diferentes escalas temporales de sus componentes, como la atmósfera y el océano, lo que genera más incertidumbre. Por esta razón, se utiliza un periodo de 30 años para el análisis climático. Los MC simulan la circulación atmosférica de manera general, pero tienen limitaciones de resolución (alrededor de 100 km), lo que dificulta la representación precisa de fenómenos locales. Para superar esta limitación, se emplean técnicas de reducción de escala, lo que añade más incertidumbre. Además, los escenarios de emisiones (SSP) que se utilizan para proyectar el clima futuro representan posibles evoluciones, lo que aumenta la complejidad y la incertidumbre al interpretar los resultados de los modelos climáticos y los impactos locales relacionados. En resumen, la incertidumbre está presente en varios aspectos de la generación de información climática, desde los modelos hasta los escenarios de emisiones, lo que complica la interpretación y comunicación de los resultados.

Los esfuerzos de la comunidad científica se centran en abordar y cuantificar las incertidumbres de las simulaciones climáticas. La principal forma de abordarlo es la estrategia de conjunto², en la que o bien se inicializa el mismo modelo con condiciones ligeramente diferentes o bien se utilizan diferentes modelos para calcular el mismo escenario SSP, habiéndose aplicado ambos enfoques para la CMIP6, con lo que se dispone de combinaciones de modelos/SSP/horizontes para proyecciones coherentes. Este enfoque muestra los diferentes resultados e impactos de los futuros estados climáticos, mostrando claramente la dispersión dentro de las simulaciones de los modelos. A menudo se aplican las medianas y cuantiles (10-90%) para obtener un mejor conocimiento y reducir la incertidumbre, mejorando la comprensión de los climas futuros para lugares específicos. Esto se aplica en SICMA-Canarias, con la visualización de Medianas y Percentiles 10-90 de los modelos considerados, además de la consulta de la dispersión de los modelos haciendo clic sobre el mapa. Tener una baja dispersión entre la mediana y los cuantiles arroja fiabilidad sobre los principales resultados climáticos, permitiendo el uso de información fidedigna; si difieren en gran medida, hay que tenerlo en cuenta, ya que significa que el estado futuro es muy incierto.

Para la presentación de los resultados relativos a las proyecciones climáticas futuras en SICMA-Canarias, se ha adoptado una estrategia de tres periodos temporales para representarlas en función de la lejanía en el tiempo: **corto plazo (2021-2050), medio plazo (2041-2070) y largo plazo (2071-2100)**. La línea base (o periodo histórico) se alinea con el AR6 del IPCC considerando también los experimentos históricos del CMIP6, fijándose en el periodo de 30 años **1985-2014**. Asimismo, la

² <https://climateinformation.org/knowledge-base/why-use-a-model-ensemble2/>

escala temporal de los resultados obtenidos va desde medias mensuales hasta valores estacionales y anuales para cada uno de los periodos climáticos mencionados.

2.3. Reducción de escala estadística. Metodología FICLIMA

La metodología estadística de downscaling aplicada en SICMA-Canarias, denominada FICLIMA (Ribalaygua et al. 2013), consiste en un método estadístico analógico/regresivo de dos pasos que se ha utilizado en proyectos nacionales e internacionales con buenos resultados de verificación (p. ej.: Monjo et al. 2016). El primer paso (véase la Figura 14) es común para todas las variables climáticas simuladas y se basa en una estratificación analógica (Zorita et al. 1993). Se aplicó un método analógico basado en la hipótesis de que los patrones atmosféricos "analógicos" (predictores) deberían causar efectos locales analógicos (predictandos), lo que significa que se seleccionó el número de días más similares al día que se iba a reducir. La similitud entre dos días cualesquiera se midió en función de tres ventanas sinópticas anidadas (con diferentes ponderaciones) y cuatro campos a gran escala utilizando una distancia pseudoeuclidiana entre los campos a gran escala utilizados como predictores. Para cada predictor, se calculó la distancia euclídea ponderada y se normalizó sustituyéndola por el percentil más cercano de una población de referencia de distancias euclídeas ponderadas para ese predictor. Este método es bueno para reproducir las relaciones no lineales entre los predictores y los predictandos, pero no podía utilizarse para simular valores fuera del intervalo de valores observados. Para superar este problema y obtener una simulación mejor, fue necesario un segundo paso.

1. Analogue stratification: Euclidean distance using normalized predictand fields

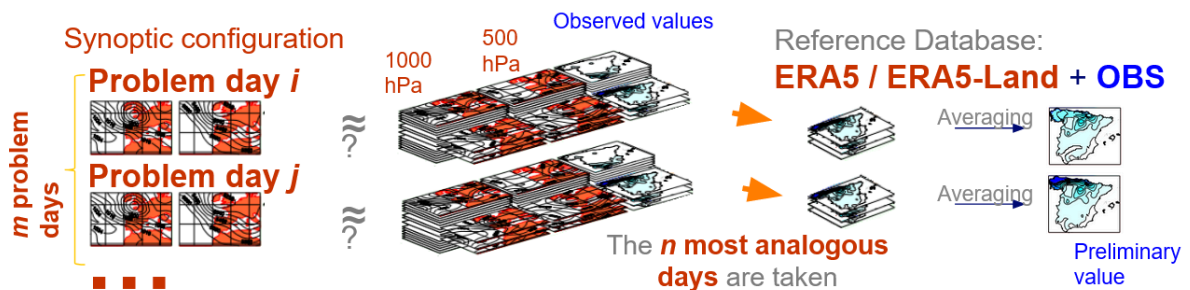
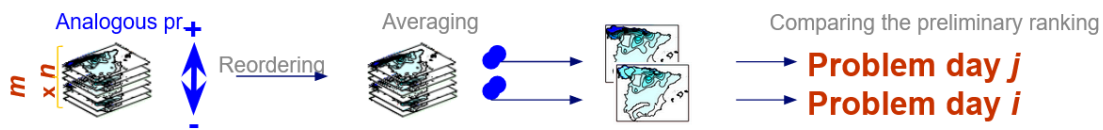


Figura 14. Características clave del primer paso de la reducción estadística de escala FICLIMA.

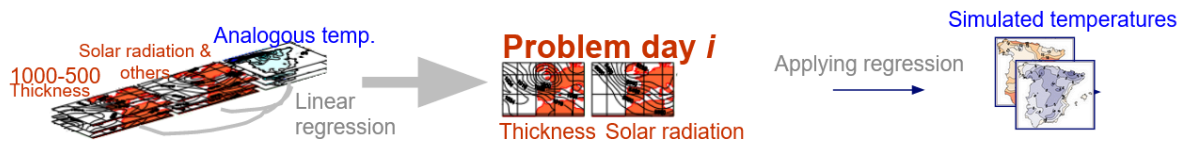
Para esta segunda etapa (véase la Figura 15), los procedimientos aplicados dependen de la variable de interés. Para determinar la temperatura, se realizó un análisis de regresión lineal múltiple para el número seleccionado de días más análogos para cada estación y para cada día problemático. A partir de un grupo de predictores potenciales, la regresión lineal seleccionó aquellos con la correlación más alta, utilizando un enfoque por pasos hacia delante y hacia atrás.

Para la precipitación, se reduce la escala de un grupo de m días problemáticos (utilizamos los días completos de un mes). Para cada día problemático obtenemos una "cantidad de precipitación preliminar" que promedia la cantidad de lluvia de sus n días más análogos, por lo que podemos ordenar los m días problemáticos de mayor a menor "cantidad de precipitación preliminar". Para asignar la cantidad de precipitación final, se ordenan todas las cantidades de los m×n días análogos y se agrupan en m grupos. Cada cantidad se asigna finalmente, de forma ordenada, a los m días previamente ordenados por la "cantidad de precipitación preliminar".

2a. Precipitation regression process: Transferring the probability distribution



2b. Temperature regression process: Linear regression



2c. Wind and other variables regression process: Transfer functions and bias correction

Figura 15. Principales características del segundo paso de la reducción estadística FICLIMA, con detalles gráficos del trabajo realizado para cada tipo de variable.

Este segundo paso realizado a escala diaria con un procedimiento de verificación minucioso interno es esencial y constituye el principal proceso diferenciador del método FICLIMA. Va más allá de los valores medios para incluir los extremos y abarca todas las escalas temporales, incluidos los intervalos diarios. Con la verificación puede comprobarse si el método simula correctamente los cambios de un día para otro, lo que indica una captura eficaz de las conexiones físicas subyacentes entre predictores y predictandos. Estos vínculos físicos permanecen relativamente constantes, incluso frente al cambio climático (a diferencia de las relaciones puramente empíricas que podrían cambiar). En esencia, este enfoque aborda teóricamente el principal reto de la reducción de escala estadística, conocido como el problema de la no estacionariedad. Este problema pone en tela de juicio la estabilidad de las relaciones predictor/predestando establecidas en el pasado, sondeando si estas relaciones persistirán en el futuro.

El método FICLIMA evalúa su propia incertidumbre con procesos internos de verificación mediante el uso de diferentes procedimientos y estadísticas, asegurando que la metodología introduce la menor cantidad de incertidumbre en los resultados, reduciendo así este factor de la ecuación de incertidumbre climática.

Como puede observarse en la Tabla 11, tras un análisis exhaustivo de los resultados de la validación para las siete islas canarias, se constata que **el modelo CMCC-ESM2 no rinde bien para la** variable temperatura, produciendo valores extraños que deben ser descartados. Para el caso de **la precipitación, el modelo que rinde peor es CanESM5, que debe ser descartado**, y CMCC-ESM2 no rinde tan bien como el resto pero sigue siendo considerado. Por tanto, estos dos modelos no serán visibles en la visualización de SICMA-Canarias ni considerados para el cálculo de estadísticas. Las variables derivadas que se alimentan de ellos, como SPEI considerando precipitación y temperatura, no presentarán resultados en esos casos.

Tabla 11 Resultados de la validación para todas las Islas Canarias considerando los resultados de temperatura y precipitación, y el rendimiento de cada uno de los 10 modelos utilizados. Tras la evaluación del rendimiento de los modelos a partir del MAE y el sesgo mensual, se presenta la evaluación final de los utilizados. Verde significa "bien", amarillo "bien pero usar con cuidado" y rojo "descartado".

Modelos	Resultados de la validación de los modelos CMIP6 en las Islas Canarias		
	Temperatura máxima	Temperatura mínima	Precipitación
ACCESO-CM2	Verde	Verde	Verde
BCC-CSM2-MR	Verde	Verde	Verde
CanESM5	Verde	Verde	Rojo
CMCC-ESM2	Rojo	Rojo	Amarillo
CNRM-ESM2-1	Verde	Verde	Verde
EC-EARTH3	Verde	Verde	Verde
MPI-ESM1-2-HR	Verde	Verde	Verde
MRI-ESM2-0	Verde	Verde	Verde
NorESM2-MM	Verde	Verde	Verde
UKESM1-0-LL	Verde	Verde	Verde

3. Indicadores climáticos y variables derivadas

Tras la finalización de los trabajos realizados en el WP1 y la mayoría de los realizados en el WP2 durante los primeros siete meses, el WP2 avanzó en la adaptación del downscaling climático sobre las Islas Canarias para calcular varios indicadores climáticos relacionados. Para ello, el WP2 ha recopilado toda la información proporcionada por el WP1 y las tareas previas del WP2 en relación con la información meteorológica y climática, incluyendo las 10 proyecciones del modelo CMIP6 downscaled con el método FICLIMA para la temperatura y la precipitación, para generar las variables climáticas derivadas y los indicadores relacionados y su posterior distribución espacial de los resultados.

Estos indicadores y variables se reúnen en torno a su vinculación con la precipitación, la temperatura o ambas. En una breve lista, éstos son el grupo completo de elementos obtenidos:

- Indicadores ligados a la temperatura:
 - Frecuencia de las olas de calor
 - Intensidad de la ola de calor (media y máxima)
 - Duración de la ola de calor
- Indicadores relacionados con las precipitaciones:
 - SPEI (3, 12 y 24 meses)
 - Balance hídrico
- Indicadores derivados de la temperatura y las precipitaciones:
 - Índice de aridez
 - Evapotranspiración potencial
 - Evapotranspiración real

En el siguiente apartado se detalla la definición y metodología de obtención de cada uno de ellos. Dado que algunas de ellas deben ser utilizadas para el cálculo de otras (como la evapotranspiración potencial es necesaria para calcular el balance hídrico), el orden de las definiciones va desde la más directa (sólo necesita temperatura o precipitación) hasta las más complejas en dependencias.

3.1. Definición y metodología

3.1.1. Olas de calor

Se entiende por ola de calor un evento de temperatura extremadamente alta que supone un riesgo para la salud humana, las infraestructuras y otros bienes críticos. Para que un evento de temperatura de este tipo sea considerado lo suficientemente extremo como para ser clasificado como un peligro y afectar al normal desarrollo de las actividades locales, debe cubrir una serie de requisitos como:

- Alta intensidad. Los valores de temperatura tienen que ser extremadamente altos en relación con lo que es habitual en el clima local. Esto supone un riesgo para la forma en que se diseñaron anteriormente las infraestructuras y a lo que los cuerpos humanos están normalmente acostumbrados a enfrentarse. Para ello, los valores tienen que estar por encima

de los valores máximos medios registrados en el periodo más cálido del año, es decir, el verano.

- Baja frecuencia. Vinculado al punto anterior, una ola de calor debe ser poco frecuente para suponer un evento extremo como definición vinculada a una distribución de probabilidad del clima local. Los percentiles son, por tanto, una buena aproximación en este sentido.
- Cierta duración en el tiempo. En el caso de un suceso relacionado con la temperatura, está demostrado que el impacto y el riesgo aumentan cuanto más tiempo dura, más que un suceso de gran intensidad de unas horas de duración. Esto es así ya que un evento de larga duración tendrá tiempo de impactar en las infraestructuras (materiales, aislamiento térmico...) y actividades (ocio, trabajo exterior) así como en la salud de la población (peor descanso, choque térmico...).

Siguiendo estos puntos, e incluyendo las particularidades de las distribuciones climáticas de los casos de estudio, los episodios de ola de calor (es decir, un periodo de días consecutivos con temperaturas máximas extremas) se han calculado considerando las definiciones propuestas por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET, en su documento [Olas_Calor_Actualizacion2024.pdf](#)), por la Organización Meteorológica Mundial (OMM, en [OMM, 2010](#)) y por el IPCC, a partir de las cuales se han establecido los criterios de cálculo y evaluación de una ola de calor (Gaitán et al. 2019). Tras diversos análisis, y con el fin de alinearnos con el método más recurrente y de mayor valor añadido para los usuarios finales del SICMA-Canarias, optamos por la definición propia de la AEMet, que también se aplica en el estudio y recopilación de las olas de calor en el archipiélago en el mismo documento:

Ola de calor: *episodio relacionado con la temperatura de al menos tres días consecutivos en el que las observaciones meteorológicas consideradas registran temperaturas máximas superiores al percentil 95% de sus registros diarios de temperaturas máximas para los meses de julio y agosto del periodo 1985-2014.*

Las olas de calor son eventos de impacto extremo en las Islas Canarias, una región que está situada muy cerca del desierto del Sahara pero que generalmente disfruta de temperaturas suaves y agradables debido al efecto de los vientos alisios durante todo el año. Cuando el patrón de vientos cambia y la capa de viento cálido sahariano irrumpe, la interacción del viento, la compleja orografía y la capa de inversión del Alto de Azor provoca condiciones extremas muy locales con temperaturas de hasta 48°C y noches que no bajan de los 30°C.

Un episodio de ola de calor se analiza en función de varias características para cada una de las cuales se ha definido un indicador diferente:

- *Duración media de las olas de calor*

La duración media de un episodio de ola de calor se define como el número de días consecutivos en los que la temperatura máxima supera el umbral establecido (3 días). Se calcula para cada uno de los 30 años de cada periodo en cuestión. En caso de más de una ola de calor en el mismo año, el valor se obtiene como la media de todos los casos.

- *Intensidad media de las olas de calor*

La intensidad media de un episodio de ola de calor es la media de los valores máximos de temperatura registrados en los días que constituyen el episodio de ola de calor. Se calcula para cada

uno de los 30 años de cada período en cuestión. Si hay más de una ola de calor en el mismo año, el valor es la media de todas.

- *Intensidad máxima de las olas de calor*

La intensidad máxima de un episodio de ola de calor es el valor más extremo de los valores máximos de temperatura registrados en los días que constituyen el episodio de ola de calor. Se calcula para cada uno de los 30 años de cada periodo en cuestión. Si hay más de una ola de calor en el mismo año, el valor es la media de todas.

- *Número de olas de calor (frecuencia)*

El número medio de olas de calor por año permite analizar las posibles tendencias de aumento o disminución de la aparición de este tipo de fenómenos. Se calcula para cada uno de los 30 años de cada periodo en cuestión.

3.1.2. Evapotranspiración potencial (ET_o)

Con el objetivo de caracterizar las particularidades climáticas de cada lugar, la estimación del régimen hídrico de un hábitat es fundamental para reconocer su capacidad para sustentar una especie, cultivo o comunidad vegetal. Para ello, es necesario conocer no sólo las precipitaciones del lugar, sino también las pérdidas potenciales de agua que puede sufrir el suelo por evapotranspiración en condiciones ideales, que a su vez dependen en gran medida de la radiación solar, entre otros muchos factores.

Para estimar esta pérdida, se utiliza la "evapotranspiración de referencia o potencial (ET_o)", que puede aproximarse de varias maneras, algunas de las cuales son más precisas (y exigen más datos) que otras. En nuestro caso, el modelo "Penman-Monteith FAO98" es el método más preciso para calcular la ET_o. Se trata de una función compleja que depende de multitud de variables, basada en los principios de la física clásica y derivada del modelo físico de conservación de la energía. Implica todos los flujos de intercambio de energía en la interfaz suelo-atmósfera, incluido el cambio de estado del agua de líquido a vapor, ya sea directamente por evaporación en el suelo o por transpiración en las plantas. Con el fin de establecer unas condiciones de medición estándar para su aplicación, el suelo se aproxima al de un cultivo de 0,12 m de altura, 70 s/m de resistencia y 0,23 de albedo. Las unidades de medida son "mm".

Según la definición Penman-Monteith de ET_o, tendríamos lo siguiente:

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \left(\frac{900}{T + 273}\right) \cdot v_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot v_2)} \quad [Eq. 1]$$

donde:

ET_o = evapotranspiración de referencia, Δ = pendiente de la curva de tensión de vapor saturado (kPa/°C), R_n = radiación solar neta sobre la superficie (MJ/m²-día), G = flujo de calor hacia el suelo (MJ/m²-día), γ = constante psicrométrica (kPa/°C), T = temperatura media del aire (°C), v₂ = velocidad media del viento (m/s), e_a = presión de vapor real (kPa), e_s = presión de vapor saturado (kPa).

Cabe destacar que el cálculo de la ETo aquí desarrollado va un paso más allá del definido como estándar, ya que el término R_n , correspondiente a la radiación neta incidente sobre la superficie de estudio, no se aproxima como incidente sobre una superficie plana, sino que se ha introducido un coeficiente corrector para ajustarlo a la topografía real, teniendo en cuenta la pendiente del terreno y su orientación, factores críticos en la ETo real de una zona. Así:

$$R_n = (1 - \alpha) \cdot \left(\frac{2 + \alpha \cdot (1 - \cos p)}{2} \right) \cdot R_s \cdot \frac{s_n}{sh_n \cdot \cos p} - R_{ol} \text{ [Eq. 2]}$$

donde:

s_n = incidencia solar, y sh_n = incidencia solar normalizada.

Así, aplicando las ecuaciones anteriores en cada punto de la malla estipulada sobre Canarias, para obtener el valor de ETo se ha hecho uso de los valores de entrada de todas aquellas variables requeridas para su uso directo o indirecto (en algunos coeficientes), siendo: las temperaturas **TMax** y **Tmin**, la temperatura de rocío (**TDew**), la presión atmosférica reducida al nivel del mar (**PSL**), el viento estimado a 2m (**V2**), la altitud de cada punto (**Z**) y su latitud, la incidencia solar (**Sn**) y la pendiente del terreno (**p**). Estas variables se han obtenido de distintas fuentes:

- Tmax y Tmin se toman directamente de cada uno de los modelos climáticos, previa corrección y downscaling de sus valores desde la malla nativa a la malla canaria. Este es el trabajo realizado y justificado en el anterior D1.
- TDew, PSL y V2 se han considerado, debido a su naturaleza y tras varias otras proyecciones climáticas realizadas por FIClima en distintas zonas en las que los valores y la incertidumbre de estas variables llevaron a la conclusión de que los cambios no suelen ser suficientemente significativos, como valores climáticos constantes. En este caso, los valores constantes se tomaron para la línea base acordada (1985-2014), y se aproximaron para cada escala temporal deseada con el valor medio (media mensual, media anual, etc.). Para más detalles, los valores se han obtenido de:
 - TDew (más exactamente RH) y V2 se obtuvieron del Atlas Climático Histórico de Canarias SITCAN (Luque Söllheim, A. L., et al., 2024), en una malla perfecta de 100x100m que cubre las escalas temporales necesarias, lo que otorga una resolución y un comportamiento magníficos para variables tan cruciales.
 - El PSL se obtuvo utilizando el reanálisis ERA5-Land tomando como periodo de referencia el intervalo 1985-2014
- Aspecto, Pendiente y Z se han obtenido directamente a partir del MDT 100x100m con la rejilla equivalente a la utilizada.
- La Incidencia Solar se ha calculado, a 100x100m, recorriendo la compleja orografía canaria, para cada día del año, con la trayectoria natural del Sol en el cielo (acimut, elevación, declinación...), teniendo en cuenta la proyección de sombras de la orografía a contabilizar sobre sombras proyectadas a lo lejos que bloquean los rayos solares en lugares donde, sin obstáculos en el horizonte, la luz incidiría directamente. El valor diario procede del cálculo y agregación de los valores horarios, desde la salida hasta la puesta del Sol, y no sólo tomando la posición del Sol a mediodía, de forma que se considera cada una de las sombras del día. En la figura 16 se muestran algunos ejemplos de resultados.

El ETo juega un papel importante en la distribución de la vegetación en las Islas Canarias, un lugar con enormes contrastes entre las partes norte y sur de cada isla y también incluso dentro de un mismo cañón. La abundancia de nubosidad y condiciones húmedas en las partes septentrionales más el menor impacto de la radiación solar, especialmente en Invierno debido a la gran orografía (grandes altitudes y fuertes pendientes), permiten la formación de exuberantes masas de bosques con modestas cantidades de precipitación, mientras que las partes meridionales de la isla sufren una alta radiación constante y condiciones de aire más seco, siendo en estas partes donde las orientaciones y la pendiente pueden facilitar condiciones ligeramente más húmedas para la vegetación.

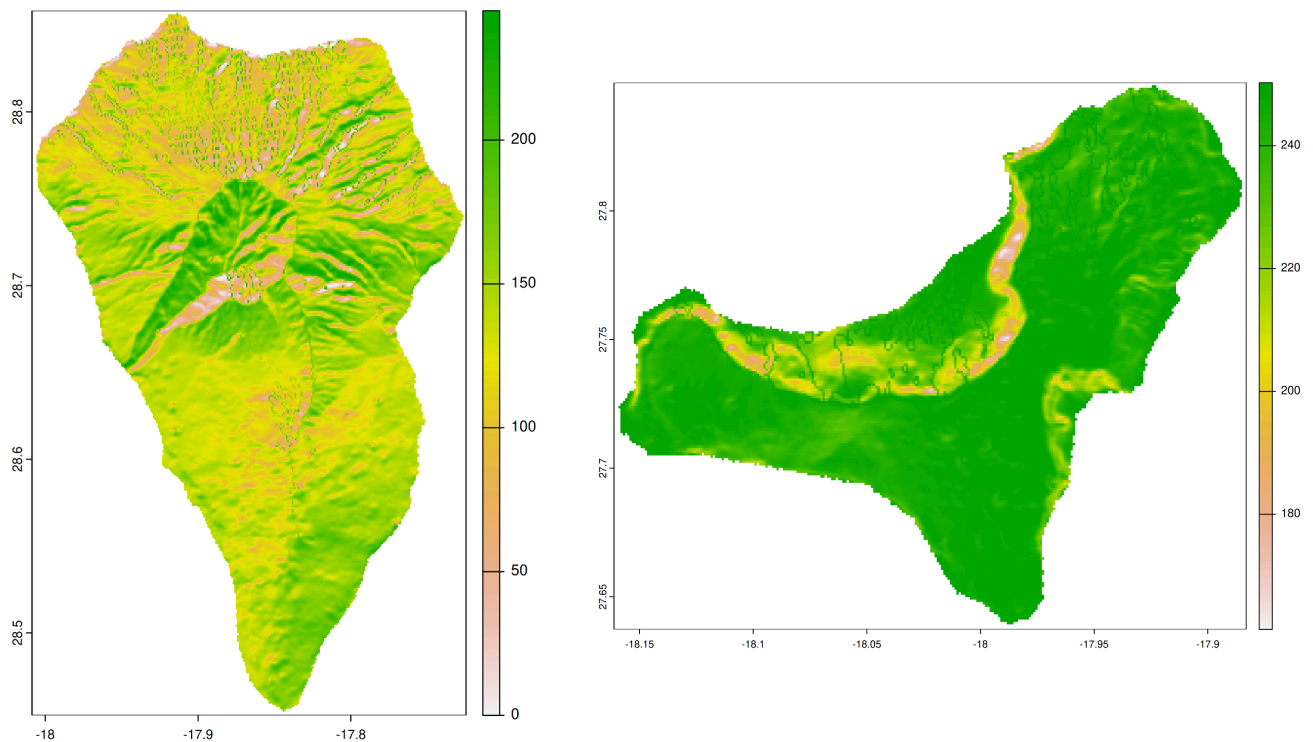


Figura 16. Ejemplo de incidencia solar real estimada en el mes de enero en la isla de La Palma (izquierda), y en el mes de agosto en la isla de El Hierro (derecha). Los valores de las leyendas no coinciden entre las imágenes.

3.1.3. Balance hídrico (BH)

El balance hídrico mensual permite aproximar la disponibilidad de agua en el suelo calculando, en nuestro caso y de forma muy simplificada, la precipitación entrante y la evapotranspiración. El balance hídrico utilizado aquí es, por tanto, potencial y sólo depende del clima. También se supone que el suelo tiene una capacidad de reserva de agua "infinita", sin límite de almacenamiento (aunque normalmente se aplica un umbral de 100 mm, aquí, en aras de la simplicidad y teniendo en cuenta la escasa pluviosidad del archipiélago y el suelo volcánico permeable, se suprimió el umbral). Si el suelo pierde toda su reserva, el BH = 0, sin tomar valores negativos.

El cálculo se realiza mediante la siguiente expresión:

$$BH_m = BH_{m-1} + Pr_m - ETo_m \Leftrightarrow BH_m > 0 \text{ [Eq. 3]}$$

Donde BH_m es el balance hídrico del mes m , Pr_m y ETo_m son la precipitación total y la evapotranspiración de referencia del mes m , y $BH_{(m-1)}$ es el balance hídrico del mes anterior. Sus unidades son "mm".

El cálculo del BH se inicia normalmente al comienzo del Año Hídrico (que varía según la zona), estando en Canarias fijado en el mes de octubre. Aquí se considera que el suelo carece de humedad, por lo que $BH_{m-1} = 0$ en todo el territorio. A partir de aquí se ha calculado mes a mes el valor correspondiente, cuidando que en los casos en que BH toma valores negativos, sea igual a cero, tomando los valores de precipitación total estimados cada mes por los modelos climáticos y la correspondiente ETo previamente calculada. El balance hídrico anual suele considerarse como la disponibilidad hídrica media anual y se calcula como la media del balance hídrico a lo largo de todo el año. A partir de esta variable climática es posible inferir multitud de nuevos índices, como la Evapotranspiración Real, que se describe a continuación.

3.1.4. Evapotranspiración real (ETr)

Como otro indicador derivado de la BH, la ETr proporciona una estimación de la pérdida real de humedad del suelo por evapotranspiración. A diferencia de la ETo, que indica la pérdida potencial en presencia permanente de agua, la ETr indica la evapotranspiración que permite realmente la humedad presente en el suelo.

Su valor lo alcanzan las condiciones:

$$\text{If } ETo_m > (BH_{m-1} + Pr_m) \Rightarrow ETr_m = BH_{m-1} + Pr_m$$

$$\text{If } ETo_m < (BH_{m-1} + Pr_m) \Rightarrow ETr_m = ETo_m \text{ [Eq. 4]}$$

Es decir, si la ETo total supera la suma de la humedad ya disponible y la aportada por las precipitaciones de ese mes, el máximo evapotranspirado será la suma de ambos valores de agua. Si la ETo es inferior a esta suma, en presencia de humedad suficiente, este valor será el evapotranspirado, quedando un remanente de agua en el suelo.

3.1.5. Índice de aridez (IA)

El índice de aridez (IA) es uno de los muchos índices utilizados para caracterizar la aridez de un lugar relacionando directamente la precipitación y la evapotranspiración de referencia en un punto mediante la expresión:

$$IA = \frac{Pr}{ET_o} \text{ [Eq. 5]}$$

Esta fórmula se ha aplicado directamente a cada punto de malla tratado en Canarias introduciendo la precipitación acumulada en el intervalo de tiempo en cuestión y la ET_o correspondiente. Se trata de un índice adimensional, con valores $0 < IA < 1$ en función de lo árido que sea un punto, e $IA > 1$ si, por el contrario, el punto es "húmedo".

3.1.6. Índice normalizado de precipitación y evapotranspiración (SPEI)

El índice de precipitación normalizado (SPI , Standard Precipitation Index) (McKee et al., 1993) se define como un valor numérico que representa el número de desviaciones típicas de la precipitación caída durante el periodo de acumulación en cuestión, con respecto a la media, una vez que la distribución original de la precipitación se ha transformado en una distribución normal.

De este modo, se define una escala de valores que se agrupa en tramos relacionados con el carácter de las precipitaciones (Tabla 1). Tiene la ventaja de poder trabajar en escalas temporales identificando diferentes tipos de sequías y sus respuestas a los distintos sistemas naturales.

Yendo más allá, el Índice de Evapotranspiración de Precipitación Estandarizado (**SPEI**, propuesto por Vicente-Serrano et al., -2010-) es una variante del SPI . Tiene un mayor potencial ya que es sensible al impacto del cambio climático al considerar el balance hídrico como la diferencia entre la precipitación mensual y la evapotranspiración potencial (calculada según Hargreaves). Al igual que con el SPI , se define una escala de valores y se agrupa en tramos (Tabla 12).

Tabla 12. Clasificación climática en función del Índice de Evapotranspiración y Precipitación Estandarizado (SPEI).

Tipo de clima SPEI	Umbrales
Extremadamente húmedo	$SPEI \geq 2.0$
Muy húmedo	$1,50 \leq SPEI < 2,00$
Moderadamente húmedo	$0,50 \leq SPEI < 1,50$
Normal	$-0,50 \leq SPEI < 0,50$
Moderadamente seco	$-1,50 \leq SPEI < -0,50$
Sequedad severa	$-2,00 \leq SPEI < -1,50$
Extremadamente seco	$SPEI < -2.00$

Los valores SPEI permiten un seguimiento muy detallado del estado real de las condiciones de sequía por falta de lluvias, incorporando precipitaciones, y también por la presencia de condiciones anómalas de altas temperaturas, como las olas de calor, que inciden en la evapotranspiración en la vegetación y los suelos de la zona. Los valores de SPEI adquieren gran importancia en una región como Canarias, normalmente azotada por olas de calor extremas y con cantidades de precipitación moderadas, muy desiguales espacial y temporalmente y con marcados patrones temporales a lo largo del año y en cada isla. En una región donde la aridez es siempre una amenaza y la disponibilidad de agua una preocupación clave, los valores SPEI nos permiten tomar conciencia del estado real de las condiciones hídricas.

4. Referencias

Bentsen, Mats; Olivie, Dirk Jan Leo; Seland, Øyvind; Toniazzo, Thomas; Gjermundsen, Ada; Graff, Lise Seland; Debernard, Jens Bolding; Gupta, Alok Kumar; He, Yanchun; Kirkevåg, Alf; Schwinger, Jörg; Tjiputra, Jerry; Aas, Kjetil Schanke; Bethke, Ingo; Fan, Yuanchao; Griesfeller, Jan; Grini, Alf; Guo, Chuncheng; Ilicak, Mehmet; Karset, Inger Helene Hafsahl; Landgren, Oskar Andreas; Liakka, Johan; Moseid, Kine Onsum; Nummelin, Aleks; Spensberger, Clemens; Tang, Hui; Zhang, Zhongshi; Heinze, Christoph; Iversen, Trond; Schulz, Michael (2019). Salida del modelo NCC NorESM2-MM preparada para el escenario CMIP6 ScenarioMIP. Version YYYYMMDD[1]. Earth System Grid Federation. doi: 10.22033/ESGF/CMIP6.608.

Bi, Daohua, Dix, Martin, Marsland, Simon, O'Farrell, Siobhan, Sullivan, Arnold, Bodman, Roger, Law, Rachel, Harman, Ian, Srbinovsky, Jhan, Rashid, Harun A., Dobrohotoff, Peter, Mackallah, Chloe, Yan, Hailin, Hirst, Anthony, Savita, Abhishek, Dias, Fabio Boeira, Woodhouse, Matthew, Fiedler, Russell, Heerdegen, Aidan, 2020: Configuration and spin-up of ACCESS-CM2, the new generation Australian Community Climate and Earth System Simulator Coupled Model. *Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science*, 70, 225, doi:10.1071/es19040.

Cherchi, A., Fogli, P.G., Lovato, T., Peano, D., Iovino, D., Gualdi, S., Masina, S., Scoccimarro, E., Materia, S., Bellucci, A. y Navarra, A., 2019. Clima medio global y principales patrones de variabilidad en el modelo acoplado CMCC-CM2. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(1), pp.185-209. <https://doi.org/10.1029/2018MS001369>.

Consortio EC-Earth (EC-Earth) (2019). EC-Earth-Consortium EC-Earth3-Veg model output prepared for CMIP6 Scenario MIP. Earth System Grid Federation. doi:10.22033/ESGF/CMIP6.727.

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., y Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, *Geosci. Model Dev.* 9: 1937-1958. doi:10.5194/gmd-9-1937-2016.

Gaitan, E., Monjo, R., Portoles, J., Pino-Otin, M.R., 2019. Proyección de temperaturas y olas de calor y frío para Aragón (España) usando un downscaling estadístico en dos pasos de las salidas de los modelos CMIP5. *Sci. Total Environ.* 650, 2778-2795

Good P., Sellar A., Tang Y., Rumbold S., Ellis R., Kelley D., Kuhlbrodt T. (2019). Salida del modelo MOHC UKESM1.0-LL preparada para CMIP6 ScenarioMIP ssp245. 1). Earth System Grid Federation. doi:10.22033/ESGF/CMIP6.6339.

Luque Söllheim A. L., Máyer Suárez P., García Hernández, F., (2024) El atlas climático digital de Canarias: Una herramienta para mejorar el conocimiento del clima y las tendencias de temperatura y precipitación en las islas atlánticas, *Servicios Climáticos*, Volumen 34 (<http://hdl.handle.net/10553/130655>)

Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., ... & Zhou, B. (2021). Climate change 2021: the physical science basis. Contribución del grupo de trabajo I al sexto informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático, 2(1), 2391.

Meinshausen, M., Nicholls, Z.R., Lewis, J., Gidden, M.J., Vogel, E., Freund, M.B., Beyerle, U., Gessner, C., Nauels, A., Bauer, N., Canadell, J.G., Daniel, J., John, A., Krummel, P.B., Luderer, G., Meinshausen, N., Montzka, S.A., Rayner, P.J., Reimann, S., Smith, S.J., van den Berg, M., Velders, G.J., Vollmer, M.K., & Wang, H.J. (2019). Las concentraciones de gases de efecto invernadero del SSP y sus extensiones a 2500. *Geoscientific Model Development Discussions*, 1-77.DOI:10.5194/gmd-2019-222Müller, W. A., Jungclaus, J. H., Mauritsen, T.,

Baehr, J., Bittner, M., Budich, R., ... & Marotzke, J. (2018). Una versión de mayor resolución del modelo del sistema terrestre del instituto max planck (MPI-ESM1. 2-HR). *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 10(7), 1383-1413.

McKee TB, Doesken NJ, Kleist J (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales. En: *Proceedings of the 8th conference on applied climatology*, vol. 17, nº 22, pp 179-183

Monjo R, Gaitán, E., Pórtoles, J., Ribalaygua, J., & Torres, L. (2016). Changes in extreme precipitation over Spain using statistical downscaling of CMIP5 projections. *Revista Internacional de Climatología*, 36(2), 757-769. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.438>

Monjo R, Pórtoles J, Ribalaygua J. 2013. Detección de inhomogeneidades en datos diarios: un test basado en el test de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov. 9th Data Management Workshop of EUMETNET, EL Escorial (Madrid), 6-8 de noviembre.

O'Neill, B. C., Kriegler, E., Ebi, K. L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D. S., ... & Solecki, W. (2017). Los caminos por delante: Narrativas para vías socioeconómicas compartidas que describen futuros mundiales en el siglo XXI. *Cambio medioambiental global*, 42, 169-180. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004>

Patiño, J., Collart, F., Vanderpoorten, A., Martin-Esquivel, J. L., Naranjo-Cigala, A., Mirolo, S., & Karger, D. N. (2023). Spatial resolution impacts projected plant responses to climate change on topographically complex islands. *Diversity and Distributions*, 29(10), 1245-1262.

Ribalaygua J, Torres L, Pórtoles J, Monjo R, Gaitán E, Pino MR. (2013). Descripción y validación de un método de downscaling analógico/regresivo en dos pasos. *Theoretical and Applied Climatology*, 114: 253-269. doi:10.1007/s00704-013-0836-x.

Seferian R. (2019). CNRM-CERFACS CNRM-ESM2-1 model output prepared for CMIP6 AerChemMIP hist-1950HC. Version YYYYMMDD[1].Earth System Grid Federation. doi:10.22033/ESGF/CMIP6.4041. Yukimoto S., Koshiro T., Kawai H., Oshima N., Yoshida, K., Urakawa S.; Tsujino H., Deushi M., Tanaka T., Hosaka M., Yoshimura H., Shindo E., Mizuta R., Ishii M., Obata A., Adachi, Y. (2019). Salida del modelo MRI MRI-ESM2.0 preparada para el CMIP6 CMIP. Federación de cuadrículas del sistema terrestre. doi:10.22033/ESGF/CMIP6.621.

Swart N. C., Cole J. N. S., Kharin V. V., Lazare M., Scinocca J. F., Gillett N. P., Anstey J., Arora V., Christian J. R., Hanna S., Jiao Y., Lee W. G., Majaess F., Saenko O. A., Seiler C., Seinen C., Shao, A., Sigmond M., Solheim L., von Salzen K., Yang D. y Winter B. (2019). El modelo canadiense del sistema terrestre versión 5 (CanESM5.0.3), *Geosci. Model Dev.*, 12, 4823-4873, doi:10.5194/gmd-12-4823-2019.

Vicente-Serrano S.M., Santiago Beguería, Juan I. López-Moreno, (2010) A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index - SPEI. *Journal of Climate* 23: 1696-1718.

Wu T., Lu Y., Fang Y., Xin X., Li L., Li W., Jie W., Zhang J., Liu Y., Zhang L., Zhang F., Zhang Y., Wu F., Li J., Chu M., Wang Z., Shi X., Liu X., Wei M., Huang A., Zhang Y. y Liu, X. (2019). El modelo del sistema climático del Centro Climático de Pekín (BCC-CSM): los principales avances de CMIP5 a CMIP6 , *Geosci. Model Dev.* 12, 1573-1600. doi:10.5194/gmd-12-1573-2019, 2019.

Zorita E, Hughes J, Lettenmaier D, Storch Hv. 1993. Stochastic downscaling of regional circulation patterns for climate model diagnosis and estimation of local precipitation. Informe técnico 109 del Instituto Max Planck de Meteorología.