



**Universidad
de La Laguna**

Estudio de las causas sinópticas de la precipitación en Canarias mediante modelos climáticos. Presente y futuro.

Realizado por

Daniel Delgado González

Tutor de TFG

Dr. Albano José González Fernández

Trabajo de fin de grado de la Universidad de La Laguna en requerimiento para
la finalización del Grado en Física

2021

Resumen

Grado en Física

Estudio de las causas sinópticas de la precipitación en Canarias mediante modelos climáticos. Presente y futuro.

Daniel Delgado González

Estudio estadístico de bases de datos de predicciones y datos reales de precipitación de las Islas Canarias mediante Análisis de Componentes Principales (PCA), técnicas de Clustering y conocimientos de meteorología para predecir el cambio de los patrones de lluvia en las Islas Canarias en el futuro.

Study of the synoptic causes of precipitation in the Canary Islands by means of climatic models. Present and future.

Physics Degree

Daniel Delgado González

Abstract

This is a statistical study of prediction databases and observational rainfall data of the Canary Islands using Principal Component Analysis (PCA), clustering techniques and meteorological knowledge to predict the change of rainfall patterns in the Canary Islands in the future.

First of all, we have to know that we are going to work with databases that represent the observations of precipitation and sea level pressure in the Canary Islands or their surroundings, and predictions of these same variables. These data covers three periods of time, one for the recent past (1980-2009) and two for the future (2030-2059 and 2060-2099). The data for the future periods cover two scenarios related to global emissions paths (RCP-4.5 and RCP-8.5). The data gathered from the past, corresponds to predictions and real data, and the data from the future, obviously corresponds to climate projections.

Specifically, the observational precipitation data for the recent past are directly extracted from the SPREAD database (R. Serrano-Notivoli, Begueria y col., 2017). This is a high-resolution gridded precipitation dataset covering Spain. This was constructed by estimating precipitation amounts and their corresponding uncertainty at each node on a 5x5 km grid. Sea level pressure data around the islands were extracted from the ERA5 reanalysis (Hersbach y col., 2020).

Apart from this, other databases are used, that correspond to regional climate models, which predict sea level pressure and precipitations, i.e., they are not observational data, but simulations of these variables. Specifically, three databases are used, each one associated to the global climate model used for its generation: GFDL, IPSL and MIROC. Both, past and a future simulations, were provided.

These models, which are regional climate simulations, have been performed with the WRF model (Non Hydrostatic Weather and Research Forecasting- WRF/ARW v3.4.1) using a unidirectional triple nesting configuration with grid resolutions of 27x27 km, 9x9 km and 3x3 km. These simulations were carried out by the Group of Earth and Atmospheric Observation (GOTA) of the University of La Laguna (ULL). The used domain is centered in the Northeast Atlantic region and covers a large area to capture the main mesoscale processes affecting the Canary climate, while other more internal domains are centered in the Canary archipelago. The WRF version and the physical parameterizations that they used to represent the different subgrid-scale atmospheric processes were selected by GOTA according to previous work in the

same study area (Pérez y col., 2014) (Expósito y col., 2015).

Now that the data used in this study have been explained, the methodology is outlined. First, some statistical methods are applied to the aforementioned databases to extract some features and information.

In this study, among other methods, we use Principal Component Analysis (PCA), which is a mathematical technique to summarize the information contained in a set of data by means of other independent parameters; more specifically, it is a rotation of the coordinate axis of the original variables to new orthogonal axes, so that these axes coincide with the direction of maximum variance of the data. In this case, the data to which we apply this method are the daily rainfall values, and the axes correspond to each of the land pixels of the Canary Islands of the SPREAD database. In this way, we manage to group the pixels of the islands in different groups in which rainfall is correlated.

Although with this method we could already have a grouping of pixels with a certain correlation in terms of rainfall, what we do now is, with the axes rotated by the PCA performed, to apply some Clustering technique to group the pixels in different regions. This should give us a coherence of the regions a little higher than the groupings that were made with the PCA. Specifically, we use the K-means method to divide the pixels of the Canary Islands in 6 groups.

The weather types for each day are determined from the sea level pressure values measured at certain points of a grid located over the Canary Islands. We use the formulas proposed by Jones y col., 2013. Once we have defined the type of weather (WT) for each day, and the amount of daily precipitation related to each of our pixel groups (regions), we can elaborate heatmaps representing the percentage of rain and annual mean precipitation or heavy precipitation days related to each WT and region.

Once we have each heatmap related to the past and to every RCP scenario of the future, we discuss them and extract some features of these heatmaps that we obtained from the aforementioned databases. These heatmaps could throw some light on how the patterns of rain in the Canary Islands could evolve from now to the next decades. Lastly, we mention some starting points on what next studies related to this subject could be based on.

Índice general

Resumen	I
1. Introducción	1
2. Datos	3
2.1. Descripción general	3
2.2. Variables y dimensiones de las bases de datos utilizadas	6
3. Metodología	7
3.1. Determinación áreas de lluvia mediante <i>Clustering</i>	7
3.2. Determinación de Weather Types (WTs)	8
3.3. Generación de tablas de calor	10
4. Resultados	12
4.1. Análisis de Componentes Principales (PCA)	12
4.2. Clustering por K-means	13
4.3. Distribución de las precipitaciones a pasado	15
4.4. Distribución de las precipitaciones a futuro	21
5. Discusión y conclusiones	33
5.1. Características de la lluvia (observaciones)	33
5.2. Comparación de modelos frente a observaciones	33
5.3. Proyección a futuro	34
5.4. ¿Qué hacer ahora?	36

Índice de figuras

2.1. Escenarios RCP a futuro	5
3.1. Malla de presiones a nivel del mar	9
4.1. Varianza por número de regiones	13
4.2. Clasificación de 6 regiones por PCA	14
4.3. Visualización de regiones por PCA	15
4.4. Clasificación de 6 Regiones por KMeans	16
4.5. División regiones por KMeans	17
4.6. Series temporales del total de precipitación mensual de 1980 a 2009 . . .	17
4.7. Tablas de calor de porcentajes de lluvia (1980-2009)	18
4.8. Tablas de calor temporales de lluvia estándar (1980-2009)	19
4.9. Tablas de calor temporales de lluvia fuerte (1980-2009)	20
4.10. Tablas de calor de porcentaje de lluvias a futuro para el modelo GFDL .	22
4.11. Tablas de calor temporales de lluvias estándar a futuro para el modelo GFDL	23
4.12. Tablas de calor temporales de lluvias fuertes a futuro para el modelo GFDL	25
4.13. Tablas de calor de porcentajes de lluvias a futuro para el modelo IPSL . .	26
4.14. Tablas de calor temporales de lluvias estándar a futuro para el modelo IPSL	27
4.15. Tablas de calor temporales de lluvias fuertes a futuro para el modelo IPSL	28
4.16. Tablas de calor de pocentaje de lluvias a futuro para el modelo MIROC .	29
4.17. Tablas de calor temporales de lluvias estándar a futuro para el modelo MIROC	31
4.18. Tablas de calor temporales de lluvias fuertes a futuro para el modelo MIROC	32
5.1. Media de cambios a futuro de los porcentajes de precipitación debidos a cada WT para las tres simulaciones	34
5.2. Media en cambio de días anuales de lluvia para todas las simulaciones .	35
5.3. Media en cambio de días anuales con lluvia fuerte para todas las simulaciones	36

Dedicado a mis padres, a Rubén y a Mikel.

Capítulo 1

Introducción

Las precipitaciones en Canarias están altamente influenciadas por las condiciones sinópticas que afectan las islas, explicando un alto porcentaje de las mismas. En algunos trabajos previos se han estudiado estos efectos utilizando datos observacionales o modelos meteorológicos en periodos de tiempo pasados (Sánchez-Benítez y col., 2017).

En este proyecto se abordará el estudio del efecto de las condiciones sinópticas utilizando simulaciones climáticas tanto a pasado como a futuro. Con ello, no sólo se analizará la capacidad de los diferentes modelos para simular la precipitación en Canarias y sus causas principales, sino, además, se estudiarán posibles modificaciones en los patrones sinópticos a futuro y sus efectos en la lluvia.

Además, el clima de las Islas Canarias varía bastante según el relieve de las islas y su localización geográfica. Entre otros factores, también tenemos varios elementos que dictaminan el clima de las Islas, como son los predominantes vientos Alisios, producidos por el anticiclón de las Azores, las corrientes del Siroco provenientes del Norte de África, las capas de inversión térmica producidas por las diferencias entre los vientos de alta y baja altitud, las perturbaciones del anticiclón de los Alisios...

Esto hace que el clima de las Islas sea de todo menos homogéneo, y que el análisis de estas condiciones no sea del todo trivial, por ello, como proyecto, se ha planteado estudiar los factores sinópticos que determinan el clima, esto es, estudiar las condiciones atmosféricas para diferentes puntos del mapa. A partir de los modelos de predicción, podemos predecir los tipos de tiempo (Weather Types/WTs), para clasificar los tipos de tiempo atmosférico. Para clasificar los WTs, utilizaremos un método similar al propuesto en los trabajos previos de Sánchez-Benítez y col., 2017.

Para empezar, utilizaremos series temporales de treinta años, y aplicaremos Análisis de Componentes Principales (PCA) y técnicas de *Clustering* a estas series de datos, para así dividir las Islas Canarias en diferentes regiones que estén correlacionadas en términos de precipitaciones. Esta primera serie de datos pertenece a una base de datos de precipitación y presión a nivel del mar de datos reales que se llama SPREAD, del año 1988 al 2009. Luego, se clasificarán los WTs de 3 simulaciones climáticas a pasado, usando como condiciones de contorno tres modelos climáticos globales diferentes (GFDL, IPSL, MirocESM). Se analizarán posteriormente estos resultados con los de las series temporales anteriores. Finalmente, se clasificarán de la

misma manera 12 predicciones a futuro, y sacaremos conclusiones de esta misma clasificación.

En el siguiente capítulo se exponen los datos que han sido utilizados para realizar el presente estudio. En el tercero se explicará la metodología utilizada. En el cuarto capítulo se analizarán los resultados. Finalmente se enumerarán las principales conclusiones extraídas tras ese análisis y se propondrán posibles trabajos futuros.

Capítulo 2

Datos

En este apartado daremos una breve descripción de las bases de datos que hemos utilizado para poder realizar el posterior análisis de éstos y así poder hacer una extracción de resultados de éstos.

In this section we will give a brief description of the databases that we have used in order to be able to carry out the subsequent analysis of these and thus be able to extract the results from them.

2.1. Descripción general

Primeramente, tenemos que saber que vamos a trabajar con bases de datos que representan las observaciones de la precipitación y la presión a nivel del mar en las islas Canarias o su entorno, o predicciones de estas mismas. En primer lugar, utilizamos matrices de datos que describen estas condiciones a pasado, concretamente desde el año 1980 al 2009.

Los datos de presión a nivel del mar en un entorno de las islas fueron extraídos del reanálisis ERA5 (Hersbach y col., 2020). Por otra parte, la base de datos SPREAD representa los datos observacionales de precipitación durante este período de tiempo, convenientemente interpolados a una rejilla. Estas bases de datos vienen en forma de matrices cuyas dimensiones representan variables. Por ejemplo, los datos de presión de ERA5 corresponden a una matriz de tres dimensiones, en la que una dimensión representa la longitud geográfica, otra la latitud y la última representa el tiempo. Es decir, tenemos muchos píxeles de datos para cada punto de las Islas, y a cada píxel le corresponden datos de presión asignados a cada día.

En concreto, los datos observacionales usados para comparar los resultados de la simulación para el pasado cercano son directamente extraídos de la base de datos SPREAD (R. Serrano-Notivoli, Begueria y col., 2017). Se trata de un conjunto de datos de precipitaciones en malla de alta resolución que cubre España. Éste fue construido estimando las cantidades de precipitación y su correspondiente incertidumbre en cada nodo en una malla de 5x5 Km. Específicamente, para las Islas Canarias, está constituido por las medidas diarias de precipitación a lo largo de 920 estaciones en el período entre 1971 y 2012. Una validación de las estimaciones de las precipitaciones estimadas para esta malla también fue realizado en este mismo estudio, y la metodología utilizada en esta base de datos está descrita en Roberto Serrano-Notivoli

CUADRO 2.1: Modelos climáticos globales CMIP5 usados por GOTA como condiciones iniciales y de contorno para las simulaciones climáticas regionales

Nombre	Institución	Resolución	Referencia
GFDL-ESM2M	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	2.5 x 2	(Dunne y col., 2012)
IPSL-CM5A-MR	Institut Pierre Simon Laplace, France	2.5 x 1.25	(Dufresne y col., 2013)
MIROC-ESM	The University of Tokyo, National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japan	2.8 x 2.8	(Watanabe y col., 2011)

y col., 2017 y R. Serrano-Notivoli, Luis y col., 2017.

Aparte de esto, tenemos otras bases de datos que corresponden a modelos climáticos regionales, los cuáles, predicen la presión a nivel del mar y la precipitación, es decir, no son datos observacionales, sino simulaciones de estos datos reales. En concreto, tenemos tres bases de datos, cada una asociada al modelo climático global utilizado para su generación: GFDL, IPSL y MIROC. Éstas tienen una parte a pasado y otra a futuro. Las características de los modelos globales utilizados se muestran en la Tabla 2.1.

A pasado tenemos estas bases de datos, que viene de las tres procedencias mencionadas anteriormente, que comprenden entre 1980 y 2009, y cuyas variables tienen dimensiones similares a las de ERA5 y SPREAD para poder compararlos estadísticamente.

Estos modelos, que son simulaciones climáticas regionales han sido efectuadas con el modelo WRF (Non Hydrostatic Weather and Research Forecasting- WRF/ARW v3 4.1) utilizando una configuración de anidamiento triple unidireccional con resoluciones de cuadrícula de 27x27 Km, 9x9 Km y 3x3 Km. Estas simulaciones fueron realizadas por el Grupo de Observación de la Tierra y la Atmósfera (GOTA) de la Universidad de La Laguna (ULL). Uno de los dominios que vamos a utilizar está centrado en la región Noreste del Atlántico y cubre un gran área para capturar los principales procesos de mesoescala que afectan al clima canario, mientras que otros dominios más internos se centran en el archipiélago canario. La versión WRF y las parametrizaciones físicas utilizadas para representar los diferentes procesos atmosféricos a escala de submalla fueron seleccionados por GOTA de acuerdo con trabajos anteriores en el mismo área de estudio (Pérez y col., 2014) (Expósito y col., 2015).

Así, los esquemas físicos que utilizaron en las simulaciones puestas a disposición de este proyecto fueron el esquema WRF de doble momento de clase 6 (WDM6) (Lim

y Hong, 2010) para la microfísica de nubes, el esquema de la Universidad de Yonsei (Hong y col., 2006) para la capa límite planetaria, el modelo de superficie terrestre Noah (Chen y Dudhia, 2001) y el Modelo Comunitario de la Atmósfera 3 (Collins y col., 2004), tanto para la radiación de onda larga como para la de onda corta. En cuanto a la parametrización de los cúmulos, utilizaron el esquema Kain-Fritsch en los dominios externos.

Para cada simulación climática, se dispone de dos escenarios de futuro distintos para las emisiones gases de efecto invernadero. Los escenarios proporcionados forman parte del proyecto ScenariMIP. Cada escenario se caracteriza por la combinación de un conjunto de condiciones socioeconómicas generales y un objetivo de forzamiento radiativo para 2100 (el forzamiento radiativo es un término técnico que puede interpretarse vagamente como una representación de la medida en que las influencias antropogénicas están empujando a la Tierra fuera de su estado preindustrial) Riahi y col., 2017). Por ejemplo, RCP4.5 tiene un objetivo de forzamiento radiativo para 2100 de 4.5 W m^{-2} . Para facilitar la trazabilidad con otras bases de datos y para reconocer que los diferentes escenarios han sido cuantificados por varios grupos de modelización, también incluimos el nombre del grupo de modelización que cuantificó el escenario en cuestión en el nombre del escenario. Por lo tanto, la convención de nomenclatura que utilizamos es "model-RCPyy", donde "model.es el modelo de evaluación integrado que cuantificó el escenario que hemos utilizado. De este modo, 'IMAGE-RCP4.5' es el escenario cuantificado por el modelo IMAGE con un objetivo de forzamiento de 4.5 W m^{-2} para el año 2100.

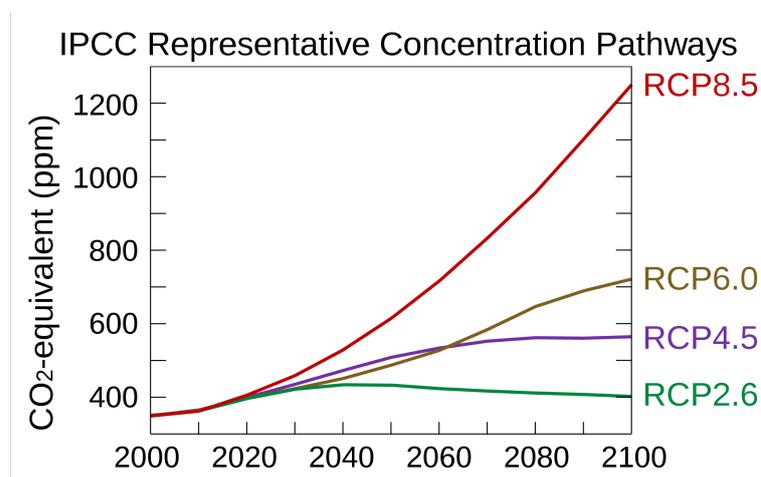


FIGURA 2.1: Concentraciones equivalentes de CO_2 para distintos escenarios RCP a futuro. Fuente: <https://commons.wikimedia.org>

En la Figura 2.1 se muestran las concentraciones de CO_2 equivalentes para cuatro escenarios a futuro. De los mostrados, en este trabajo se usarán simulaciones realizadas con uno intermedio, RCP4.5, en el que la concentración de gases de efecto invernadero se estabiliza en la segunda mitad del siglo, y el más extremo, RCP8.5, en el que siguen aumentando a un ritmo similar al actual.

2.2. Variables y dimensiones de las bases de datos utilizadas

A continuación, representamos una tabla donde exponemos la dimensión de la variable tiempo, correspondiente tanto a las bases de datos observacionales, a pasado, como a los correspondientes a los modelos climáticos a pasado y a futuro:

CUADRO 2.2: Longitud de la variable tiempo para cada modelo y período

Base de Datos	Tiempo	Base de Datos	Tiempo
SPREAD-Era5	10958	IPSL 2030-2059 RCP-4.5	10957
GFDL 1980-2009	10509	IPSL 2030-2059 RCP-8.5	10896
IPSL 1980-2009	10926	IPSL 2070-2099 RCP-4.5	10897
MIROC 1980-2009	10915	IPSL 2070-2099 RCP-8.5	10927
GFDL 2030-2059 RCP-4.5	10462	MIROC 2030-2059 RCP-4.5	10944
GFDL 2030-2059 RCP-8.5	10814	MIROC 2030-2059 RCP-8.5	8507
GFDL 2070-2099 RCP-4.5	10293	MIROC 2070-2099 RCP-4.5	10941
GFDL 2070-2099 RCP-8.5	10903	MIROC 2070-2099 RCP-8.5	10934

Vemos que solo mencionamos la variable tiempo ya que las variables anchura y altura de estas bases son constantes, siendo de 148x296 para las bases de precipitaciones y de 121x121 para las bases de datos de presión a nivel del mar.

A futuro, tenemos dos períodos de tiempo 2030-2059 y 2070-2099 de los modelos climáticos de procedencias mencionadas anteriormente (GFDL,IPSL y MIROC), pero cada uno comprende dos escenarios, RCP-4.5 y RCP-8.5. Es decir, a futuro, tendremos que utilizar 12 simulaciones, 6 para los tres modelos de procedencia distinta y dos periodos (2030-2059 y 2070-2099) para el escenario RCP-4.5, y lo mismo para el escenario RCP-8.5.

Capítulo 3

Metodología

A continuación, definiremos la metodología que aplicaremos a las bases de datos mencionados anteriormente. Entre otras cosas, expondremos las fórmulas que usaremos para definir los tipos de tiempo, algunos de los métodos estadísticos que utilizaremos, la malla geográfica que utilizaremos para las presiones y demás.

Next, we will define the methodology we will apply to the aforementioned databases. Among other things, we will outline the formulas we will use to define the time types, some of the statistical methods we will use, the geographical mesh we will use for the pressures and so on.

3.1. Determinación áreas de lluvia mediante *Clustering*

En este estudio, entre otros métodos, utilizamos Análisis de Componentes Principales (PCA), el cuál es una técnica matemática para resumir la información contenida en un conjunto de datos mediante otros parámetros independientes entre sí. Más concretamente, es una rotación del eje de coordenadas de las variables originales a nuevos ejes ortogonales, de manera que estos ejes coincidan con la dirección de máxima varianza de los datos. En este trabajo se ha utilizado la matriz de covarianza y una rotación Varimax para redistribuir la varianza explicada por las componentes y así obtener componentes con mayor significado físico, como sugieren Sánchez-Benítez y col., 2017. En concreto, se ha utilizado el paquete R *psych* (Revelle, 2021).

En este caso, los datos a los que vamos a aplicar este método son los valores diarios de precipitación, y los ejes corresponden a cada uno de los píxeles de tierra de la Islas Canarias de la base de datos SPREAD. Así, conseguimos agrupar los píxeles de las Islas en diferentes grupos en los que la lluvia está correlacionada.

A pesar de que con este método ya podríamos tener unas agrupaciones de píxeles con cierta correlación en cuánto a lluvias, lo que hacemos ahora es, con los ejes rotados por el PCA ya realizado, aplicamos alguna técnica de *Clustering* para agrupar los píxeles en diferentes regiones, esto nos tendría que dar una coherencia de la regiones un poco mayor a las agrupaciones que estaban realizadas con el PCA.

En concreto, en cuanto a técnicas de *Clustering*, después de probar diversas de éstas, utilizamos K-means, el cuál es una manera de realizar un conjunto de k agrupaciones a partir de n observaciones. Las observaciones dentro de cada

agrupación tienen que tener características similares entre sí, es decir, estar correlacionadas. Esta técnica se basa en tener varios centroides, tantos como agrupaciones queramos. Estos centroides tienen un radio que agrupa varias observaciones. A cada iteración, la posición de los centroides se actualiza a la posición de centro de masas de las observaciones que están dentro del radio de cada centroide.

Aplicamos el PCA a la base de datos observacionales de lluvia SPREAD en cada píxel de las Islas Canarias. Luego, con los ejes rotados, aplicamos K-means, dividiendo las Islas en n regiones, lo cuál es intuitivo, ya que en las Islas llueve diferente según en que área te encuentres, en Lanzarote no llueve de forma similar a La Palma, pero en el Hierro pueden caer precipitaciones de forma más similar, es decir, pueden tener la precipitación más correlacionada.

3.2. Determinación de Weather Types (WTs)

Los tipos de tiempo de cada día se determinarán a partir de los valores de la presión a nivel del mar medidos en ciertos puntos de una malla situada sobre las Islas Canarias. Utilizaremos las fórmulas propuestas por Jones y col., 2013. para clasificar los tipos de tiempo a partir de las presiones a nivel del mar de los puntos de la malla de la figura 3.1.

$$W = \frac{1}{2} (P_{12} + P_{13}) - \frac{1}{2} (P_4 - P_5) \quad (3.1)$$

$$S = \frac{1}{\cos(\lambda)} \left[\frac{1}{4} (P_5 + 2P_9 + P_{13}) - \frac{1}{4} (P_4 + 2P_8 + P_{12}) \right] \quad (3.2)$$

$$ZW = \frac{\sin(\lambda)}{\sin(\lambda - 5^\circ)} \left[\frac{1}{2} (P_{15} + P_{16}) - \frac{1}{2} (P_8 + P_9) \right] - \frac{\sin(\lambda)}{\sin(\lambda + 5^\circ)} \left[\frac{1}{2} (P_8 + P_9) - \frac{1}{2} (P_1 + P_2) \right] \quad (3.3)$$

$$ZS = \frac{1}{2 \cos^2(\lambda)} \left[\frac{1}{4} (P_6 + 2P_{10} + P_{14}) + \frac{1}{4} (P_3 + 2P_7 + P_{11}) - \frac{1}{4} (P_5 + 2P_9 + P_{13}) - \frac{1}{4} (P_4 + 2P_8 + P_{12}) \right] \quad (3.4)$$

Donde la variable P es la presión a nivel del mar medida sobre los puntos de la siguiente malla, con los correspondientes índices (malla situada convenientemente sobre las islas, Figura 3.1)

Éstas son las ecuaciones para determinar los flujos de viento a escala sinóptica a partir de los gradientes de presión. Donde W es el flujo del oeste, S el del Sur, ZW es la vorticidad de cizalladura del oeste y ZS la del Sur. La latitud media de las Islas Canarias viene dada por el parámetro λ y la presión a nivel del mar en el punto x viene dada por

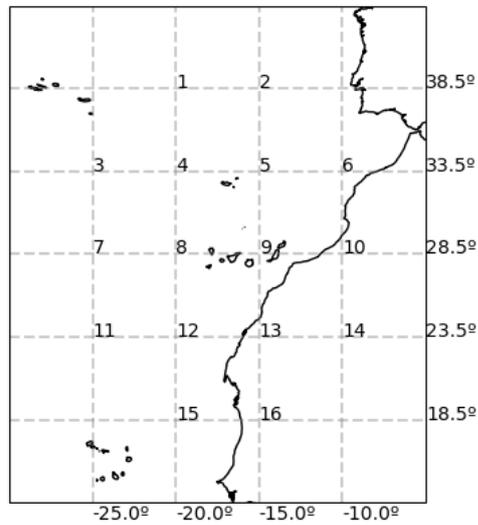


FIGURA 3.1: Grid utilizado sobre las Islas

P_x . A partir de estos parámetros podemos definir los siguientes, el flujo resultante (F) y la vorticidad total(Z):

$$F = \sqrt{W^2 + S^2} \quad (3.5)$$

$$Z = ZW + ZS \quad (3.6)$$

A partir de todos estos parámetros que acabamos de definir, podemos determinar los tipos de tiempo (Weather Types-WTs) estableciendo una serie de condiciones. Para el flujo tendremos la siguiente clasificación de tiempos:

- $|Z| < F$ ->Será flujo lineal, es decir, un flujo puramente direccional.
- $|Z| > 2F, Z > 0$ ->Flujo ciclónico
- $|Z| > 2F, Z < 0$ ->Flujo anticiclónico
- $F < |Z| < 2F$ ->Flujo de tipo híbrido, es decir, combinación entre ciclónico o anticiclónico y direccional.
- $F < 3, |Z| < 3$ ->Indefinido, es decir, no se podrá clasificar el tipo de tiempo de este caso.

La dirección del viento la determinaremos mediante el siguiente ángulo:

$$\theta = \arctan\left(\frac{W}{S}\right) \quad (3.7)$$

Donde clasificaremos el tiempo en ocho tipos de viento diferente dependiendo de la dirección de éste:

$$337,5^\circ < \theta < 22,5^\circ \rightarrow \text{Sur (S)}$$

$$22,5^\circ < \theta < 67,5^\circ \rightarrow \text{Suroeste (SW)}$$

$$67,5^\circ < \theta < 112,5^\circ \rightarrow \text{Oeste (W)}$$

$$112,5^\circ < \theta < 157,5^\circ \rightarrow \text{Noroeste (NW)}$$

$$157,5^\circ < \theta < 202,5^\circ \rightarrow \text{Norte (N)}$$

$$202,5^\circ < \theta < 247,5^\circ \rightarrow \text{Noreste (NE)}$$

$$247,5^\circ < \theta < 292,5^\circ \rightarrow \text{Este (E)}$$

$$292,5^\circ < \theta < 337,5^\circ \rightarrow \text{Sureste (SE)}$$

Así quedará inequívocamente clasificado el tipo de tiempo (WT) según la dirección del viento y el flujo en los que podremos clasificar cada caso. Aplicamos esta clasificación para la bases de datos de presión a nivel del mar que hemos mencionado en el capítulo de datos, tanto a pasado como a futuro, así para cada base de datos, tendremos definido para cada día que abarcan estas bases de datos el tipo de tiempo con el viento predominante. Así con una base de datos reales a pasado, tres de modelos climáticos también a pasado, y doce a futuro, en total dieciseis bases de datos de presión a nivel del mar, para cada uno generaremos un fichero donde quede inequívocamente clasificado el tipo de tiempo y la dirección de viento predominante para cada día de cada base de datos.

Además, para cada una de estas bases de datos de presión a nivel del mar, tendremos su correspondiente base de datos de precipitaciones que comprende el mismo período. Así, para estas dieciseis bases de datos de lluvia, generaremos dieciseis correspondientes ficheros donde tengamos la precipitación total y media caída en cada región clasificada anteriormente. Donde la precipitación media de cada región es igual a la precipitación total recogida en cada región partido por el número de píxeles que comprende dicha región.

3.3. Generación de tablas de calor

Ahora, tendremos en total 32 ficheros que comprenden las fechas comprendidas por las correspondientes bases de datos, donde tenemos clasificado el tipo de tiempo (WT) para cada día, la dirección dominante del viento y la precipitación media y total caída en cada región ese mismo día. ¿Qué podemos hacer con esta información? Estadística, en concreto vamos a generar tablas de calor donde sea visible para cada región por separado, qué porcentaje de lluvia se debe a cada tipo de tiempo

(Ciclónico, anticiclónico o Híbrido y Lineal) y el porcentaje de lluvia para dirección predominante del viento, solo en los casos donde el tipo de clima sea lineal o híbrido, ya que los tipos ciclónicos o anticiclónicos no los podemos asociar a una dirección concreta del viento. Además de porcentaje de lluvia, también representaremos el número medio anual de días de lluvia total y el número medio anual de días de lluvia fuerte para cada tipo de tiempo y dirección del viento.

Después de haber obtenido estas tablas de calor, lo que podemos hacer es, a pasado, comparar las tablas de calor asociadas a cada simulación climática con aquella que describe las observaciones de 1980 a 2009, así, podemos obtener la precisión de cada modelo climático a pasado. En cambio, a futuro, comparando las tablas de calor de cada modelo climático con su correspondiente tabla de calor a pasado, lo que obtenemos es el cambio que estima ese modelo climático respecto al pasado, es decir, la predicción de cómo cambiará el tiempo a futuro según cada simulación climática y según qué escenario (RCP-4.5 o RCP-8.5). Todo esto puede analizarse por cada región, por tipo de tiempo (WT) o por dirección predominante del viento, en caso de que el WT correspondiente al día sea lineal o híbrido, como hemos dicho anteriormente.

Además, como hemos mencionado, lo que también realizamos es registrar los días de lluvia ($>0.5\text{mm}$ de media en una región) y los días de lluvia fuerte ($>5\text{mm}$) para cada región utilizando los ficheros donde registramos la precipitación diaria regionalizada. Con este registro, lo que realizamos es otra tabla de calor, pero con el número de días anuales promedio que llueve o de precipitación fuerte para un WT o para cada dirección de viento predominante.

El objetivo de estas tablas de calor 'temporales' es compararlo con las anteriores tablas de calor y así poder elaborar conclusiones sobre la intensidad de la lluvia en cada región producida por WTs y direcciones de viento.

Capítulo 4

Resultados

A continuación, expondremos los resultados y las tablas de calor que hemos obtenido aplicando la metodología que hemos descrito en el apartado anterior a las bases de datos correspondientes a este trabajo.

We will now present the results and the heat tables that we have obtained by applying the methodology described in the previous section to the databases corresponding to this work.

4.1. Análisis de Componentes Principales (PCA)

Como se mencionó anteriormente, aplicamos el PCA a los datos observacionales de precipitación de 1980 a 2009 para dividir las islas en diferentes regiones. En primer lugar, realizamos varios análisis para diferentes números de áreas. En la Figura 4.1, se muestra el porcentaje de varianza explicado por cada componente principal para diferentes números de componentes totales.

Realizamos el ejercicio de analizar cada una de estas clasificaciones, y al final concluimos que la división de 6 componentes es la óptima, ya que no hay una caída en el porcentaje de varianza muy grande y todas las componentes tienen un porcentaje similar, diferenciando aquellas componentes que realmente aglutinan la mayor parte de la información de los datos iniciales.

Después de haber seleccionado la agrupación de 6 componentes principales, a las que denominamos PCs, vemos cómo se diferencia cada PC por el método PCA y, posteriormente, por varios métodos de *Clustering*, entre ellos, elegiremos el K-means para como método de recolección de grupos correlacionados de precipitación.

Si atendemos solamente a los valores de las 6 componentes principales, podemos establecer regiones según el mayor valor de una componente principal determinada. Por ejemplo, la región 1 estará compuesta por todos aquellos píxeles para los que la primera componente principal sea mayor que el resto, la región 2 por aquellos cuyo valor de la segunda componente principal sea el mayor, etc. En la Figura 4.2 se muestra, para cada píxel, el mayor valor de componente principal. Cada píxel aparece solamente en el mapa correspondiente a la componente principal máxima. De esta forma ya se pueden intuir las regiones en las que la precipitación diaria se comporta de una manera similar.

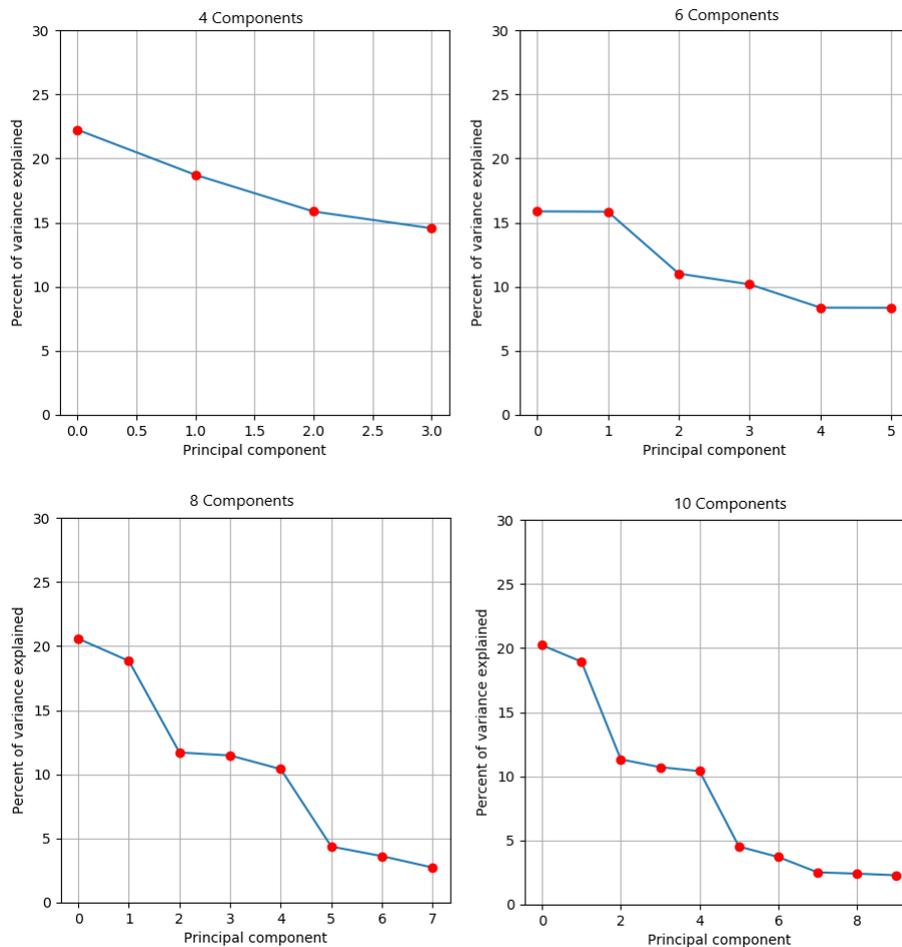


FIGURA 4.1: Varianza explicada por cada componente principal para distintos números de regiones

4.2. Clustering por K-means

Además de este algoritmo concreto, hemos realizado otras técnicas de clustering, entre las cuales, en base a los resultados obtenidos y tras la inspección visual, hemos elegido K-means para la clasificación final de las áreas en las que dividimos las Islas.

Podemos ver que las dos clasificaciones entre PCA y K-means (Figura 4.5 y 4.3) son bastante parecidas, casi idénticas excepto en algún que otro píxel. Nos quedamos con la clasificación que hacemos con la técnica de *Clustering*, tras la cual se obtiene la siguiente clasificación:

Región 1 -> Sur de Gran Canaria

Región 2 -> Norte de Fuerteventura y casi todo el área que comprende Lanzarote

Región 3 -> Sur de Fuerteventura y unos pocos píxeles del interior de Lanzarote

Región 4 -> Sur de Tenerife y de la Gomera

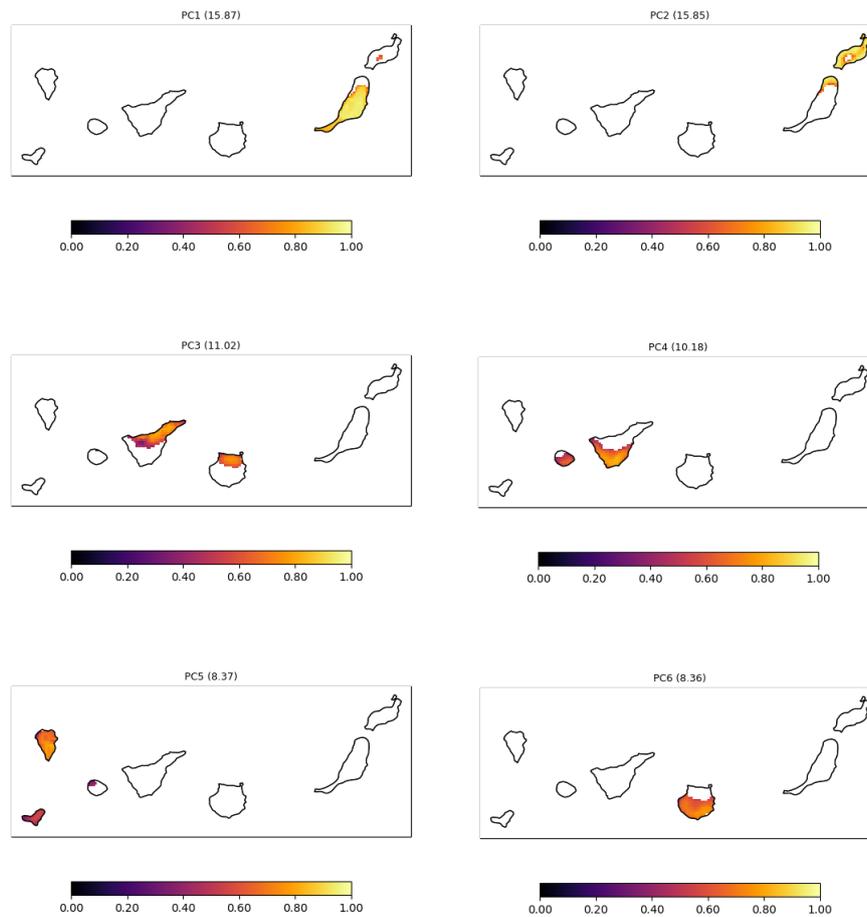


FIGURA 4.2: Clasificación de 6 regiones por PCA. Junto a cada componente principal se indica la variancia explicada por la misma.

Región 5 ->El Hierro, la Palma y norte de la Gomera

Región 6 ->Norte de Tenerife y de Gran Canaria

Lo cuál es bastante lógico, ya que las condiciones meteorológicas son más cálidas y menos lluviosas de este a oeste, y en este caso, tenemos agrupadas áreas de este a oeste respectivamente. Por ejemplo, vemos que tenemos dos regiones (2 y 3) que pertenecen solo a Fuerteventura y Lanzarote, que son las dos Islas más áridas de todas. Asimismo, en las islas centrales quedan separadas claramente las regiones de las laderas norte de las orientadas al sur, mucho más secas.

Es más, hemos realizado una representación de las series temporales de precipitación de cada una de las regiones para estos 30 años en los que analizamos la lluvia (Figura 4.6).

Los resultados también concuerdan con lo que uno esperaría, ya que podemos ver que las regiones en las que menos llueve son la 2 y la 3, que coinciden con Lanzarote y Fuerteventura, que son las islas más orientadas al sur, y por tanto,

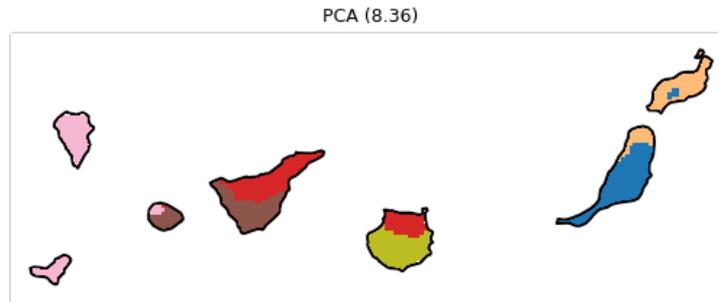


FIGURA 4.3: División de las Islas en 6 regiones por PCA

más áridas. A medida que nos dirigimos al oeste, tenemos la región 5, en la que podemos ver que más precipitación cae, la cuál corresponde con las Islas más occidentales. Así, el orden de regiones según la cantidad de lluvia que cae por región (de menos a más) son la región 3 (Sur de Fuerteventura), Región 2 (Norte de Fuerteventura y casi todo Lanzarote), Región 1 (Sur de Gran Canaria), Región 4 (Sur de Tenerife y de La Gomera), Región 6 (Norte de Tenerife y de Gran Canaria) y Región 5 (El Hierro, la Palma y norte de La Gomera).

4.3. Distribución de las precipitaciones a pasado

Ahora que ya tenemos las regiones para cada región, lo que hacemos es generar los 32 ficheros para lluvia y presión a nivel del mar por separado mencionados en el anterior apartado de metodología. A partir de estos ficheros, generamos las siguientes tablas de calor a pasado.

En la figura 4.7 podemos ver que para la tabla de calor SPREAD, que hemos comentado que corresponde a datos observacionales de precipitación sobre las Islas Canarias entre los años 1980 y 2009. En éste, se aprecian características reconocibles de las precipitaciones de las Islas Canarias. Por ejemplo, hay un importante porcentaje de precipitaciones que se producen en situaciones con viento de dirección noreste en la región 6 (Norte de Gran Canaria y Tenerife), los cuáles son los correspondientes a los vientos Alisios. También podemos ver que en todas las regiones llueve de forma similar o mayor por el carácter ciclónico del tiempo que por el carácter anticiclónico, siendo el último el carácter más propio del clima de nuestras Islas. También podemos ver que en todas las regiones, excepto en la sexta, la mayoría de precipitaciones por

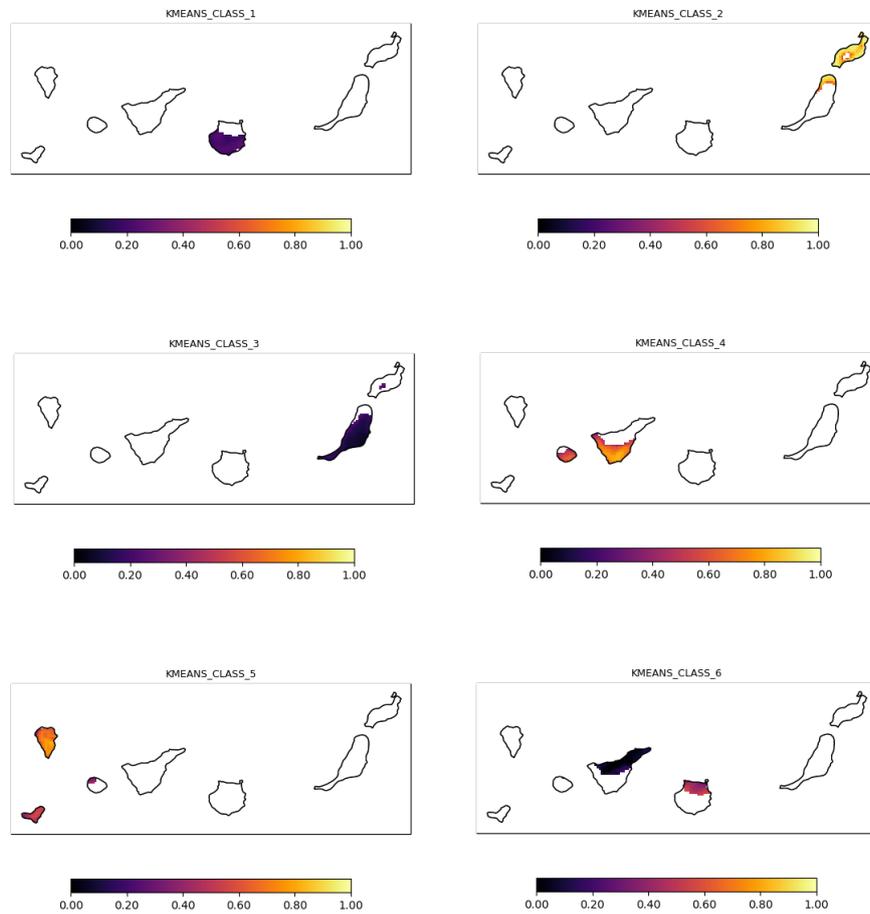


FIGURA 4.4: Clasificación de Regiones por k-means

flujo lineal son debidos a dirección de viento del Oeste.

Las tablas de calor que contienen los errores relativos de los diferentes modelos climáticos a pasado tienen los mismos límites en cuánto a paleta de colores se refiere, así que a primera vista, lo que podemos ver es que el modelo alimentado por MIROC es el que concentra menos error relativo en cuanto a WTs, podemos comprobarlo visualmente, ya que a cuanto menos vivos son los colores de cada casilla de error relativo, menos error relativo. En conclusión, visualmente la tabla de errores relativos del modelo con MIROC se compone de colores menos vivos que los dos restantes, y por ello, tiene más precisión a pasado. A grandes rasgos, las simulaciones tienden a subestimar los porcentajes de precipitación anual debidos a casi todos los tipos de tiempo, que, sin embargo, se acumulan en los casos anticiclónicos, sobre todo para la región del sur de Gran Canaria (región 1), y en los que el viento sopla del este (casi todas las regiones).

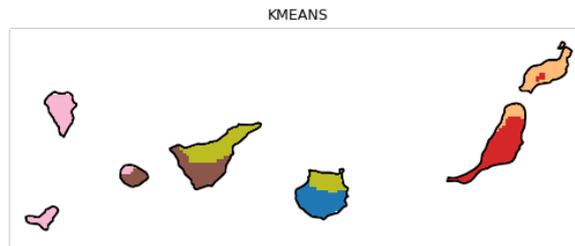


FIGURA 4.5: División de las Islas en 6 regiones por KMeans

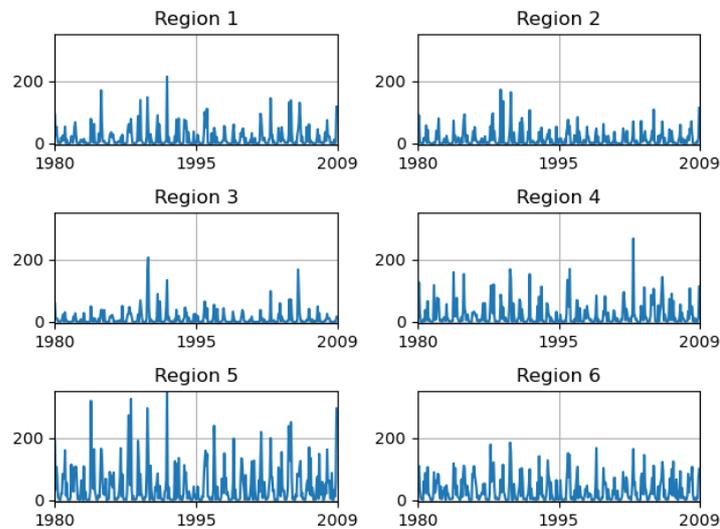


FIGURA 4.6: Precipitación de cada región para los 30 años.

Ahora, para las figuras 4.8 y 4.9 podemos ver el número de días promedio que llueve al año debido a un cierto WT o dirección predominante del viento. Los resultados a pasado se han estudiado según nos refiramos a lluvia normal o lluvia fuerte respectivamente. Como día de lluvia en un lugar concreto se suele considerar de manera estándar aquél cuya precipitación es de al menos 1 mm y días de lluvia fuerte los que sobrepasan los 10 mm. Como en este caso estamos utilizando la lluvia promedio diaria en cada una de las regiones, que son bastante amplias, se lan considerado los umbrales 0.5 y 5 mm, respectivamente.

Para la primera tabla de calor temporal que mencionamos (de número de días total de lluvia), que corresponde a SPREAD, se muestra el número promedio de días anuales en los que llueve por un determinado WT o por una dirección del viento predominante en caso de que el WT sea lineal o híbrido. Las demás tablas de calor se

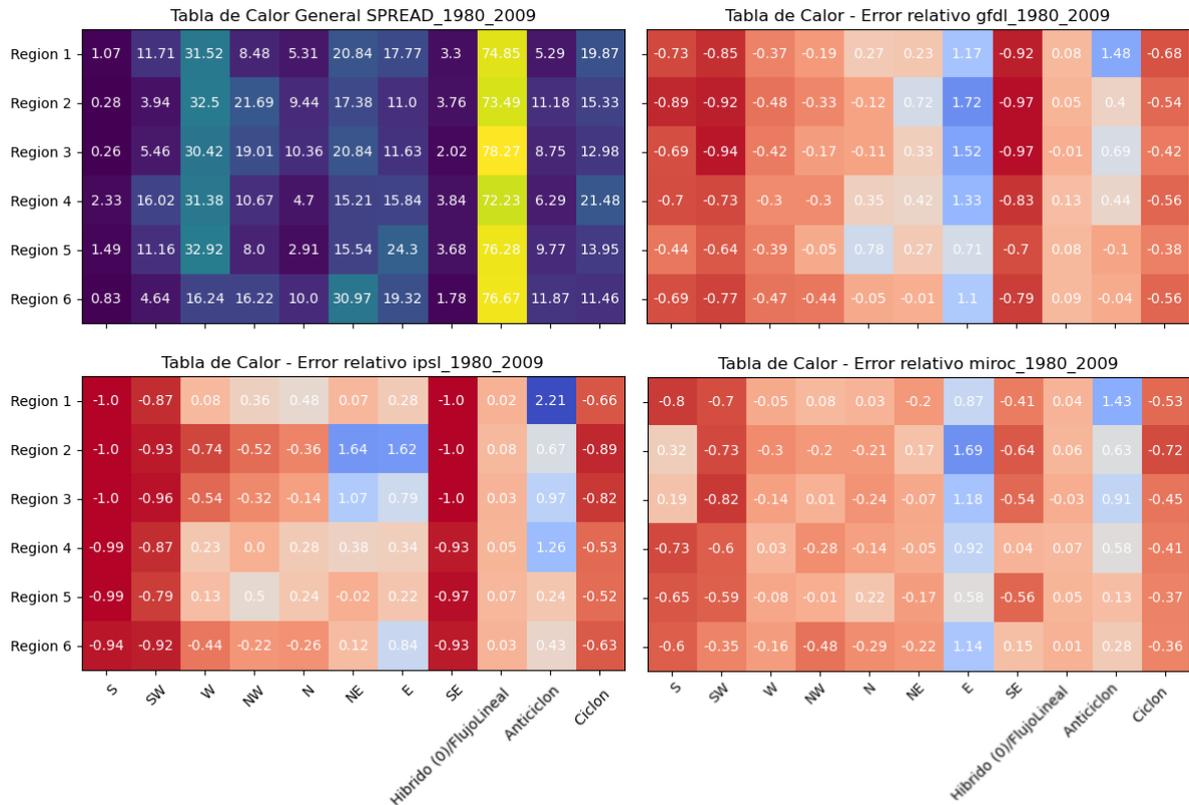


FIGURA 4.7: Tablas de calor (1980-2009) de porcentajes de precipitación anual por WT y dirección predominante del viento, tanto para las observaciones (SPREAD) como de las diferencias entre cada una de las simulaciones y las observaciones.

refieren a los errores respecto al SPREAD de cada simulación climática regional, en cuanto a días promedio anuales de lluvia. Así, podemos ver que para el SPREAD, en las regiones 4, 5 y 6, cuando hay WT lineal o híbrido, cuando más llueve es con direcciones de viento de componente este o noreste, llegando en los dos últimos a tener hasta casi 20 días de lluvia promedio anuales por cada una de estas direcciones del viento.

Cuando menos llueve para todas las regiones en general, es cuando hay viento dirección Sur o Suroeste. También podemos ver que, en todas las regiones, hay más días de lluvia cuando hay componente anticiclónica, esto, con los dicho anteriormente sobre que cae más cantidad de lluvia con componente ciclónica nos hace concluir que llueve menos frecuentemente cuando hay clima ciclónico que anticiclónico, pero que llueve con más intensidad.

Además, para el error temporal en precipitaciones, podemos ver que para la simulación climática que parte de los datos de GFDL, los mayores errores están en la dirección Noreste y Este, y en los WTs lineal, híbrido y anticiclónico, llegando a haber diferencias de alrededor de 5 a 40 días de exceso de lluvia según la región a la que nos refiramos, como hemos dicho, es muy visual la representación de tablas de calor, y en

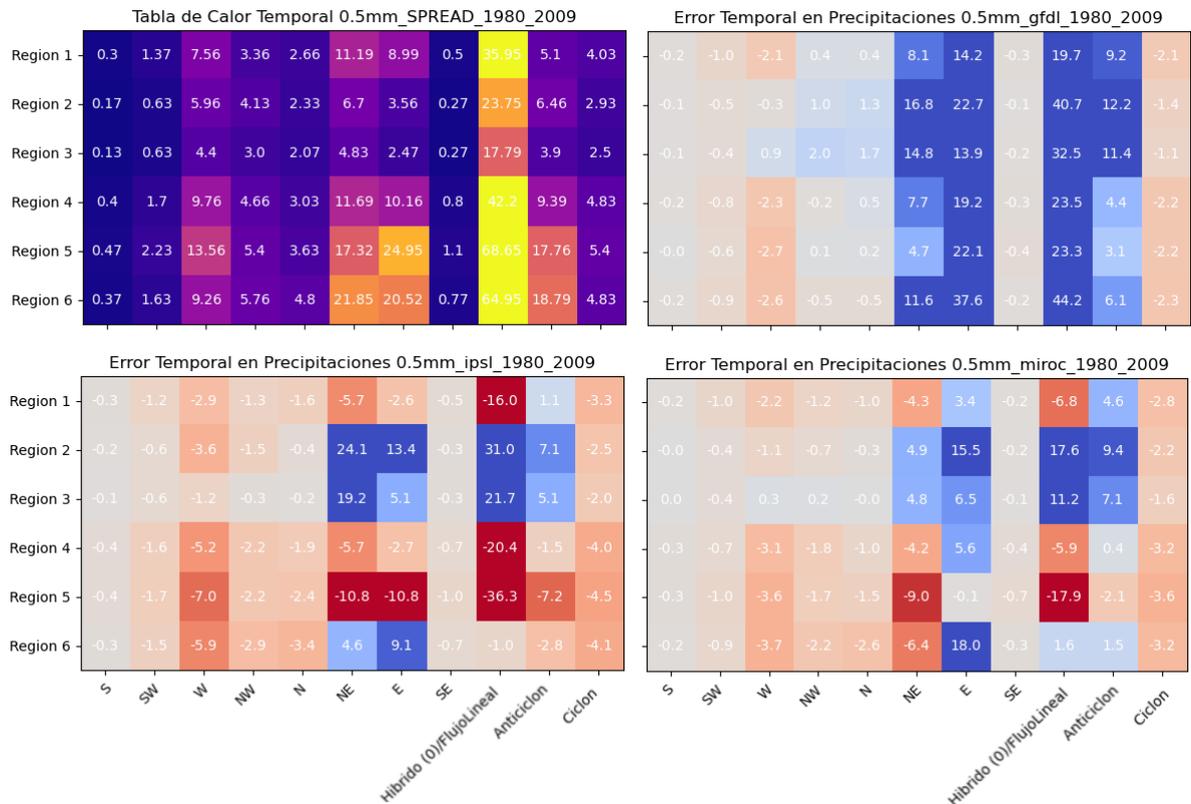


FIGURA 4.8: Tablas de calor con días anuales promedio de lluvia estándar por cada WT y dirección predominante del viento

la segunda gráfica es muy visible este contraste de diferencia de días entre SPREAD y GFDL. Además, se ve claramente que, en general, esta simulación sobrestima la cantidad de días de lluvia, ya que los excesos (en azul) no se ven compensados por una subestimación importante en otros WTs o direcciones.

Para la simulación que se basa en los datos de IPSL podemos ver que tenemos los mayores errores en las mismas direcciones del viento y WTs, lo que pasa que esta vez varían desde menos de veinte días a alrededor de treinta según la región a la que nos refiramos. Se observa una sobrestimación de días de lluvia anuales en Lanzarote y Fuerteventura (regiones 2 y 3) y una subestimación en las islas más occidentales (región 5).

Para la tabla de calor correspondiente a MIROC, tenemos más de lo mismo, pero en cambio, este tiene un rango de error menor, teniendo hasta veinte días de error por encima o por debajo con respecto al SPREAD para estos WTs, dependiendo de la región a la que nos estemos refiriendo. Esta tabla de calor tiene menos casillas de colores vivos, lo cuál quiere decir que tiene menos error con respecto a la primera tabla de calor.

En la figura 4.9 exponemos las tablas de calor temporal para días en los que hay

lluvia fuerte (>5mm). Es decir, el número de días promedio anualmente en los que llueve fuerte para un cierto WT o para una dirección de viento predominante. Como es obvio, vemos que la tabla actual del SPREAD tiene valores mucho menores a la anterior debido a que nos estamos refiriendo a lluvias más fuertes, que están contenidos en el día total de días de lluvia (>0.5mm), y que son menos frecuentes. En dicha figura podemos ver que para la base de datos SPREAD se reduce muy sustancialmente el número de días de lluvia fuerte para cada casilla, teniendo más peso las direcciones de viento Noreste, Oeste y Este.

Como podemos ver, en las tablas de calor de todos los modelos no predominan los colores vivos, debido a que los errores son pequeños, excepto por alguna que otra casilla. En concreto, para el modelo basado en GFDL tenemos los mayores errores para las direcciones de viento Noreste y Este, de WTs híbrido y lineal para las regiones 5 y 6, donde los errores son positivos y varían alrededor de 2 a 8 días con respecto a la primera tabla de calor.

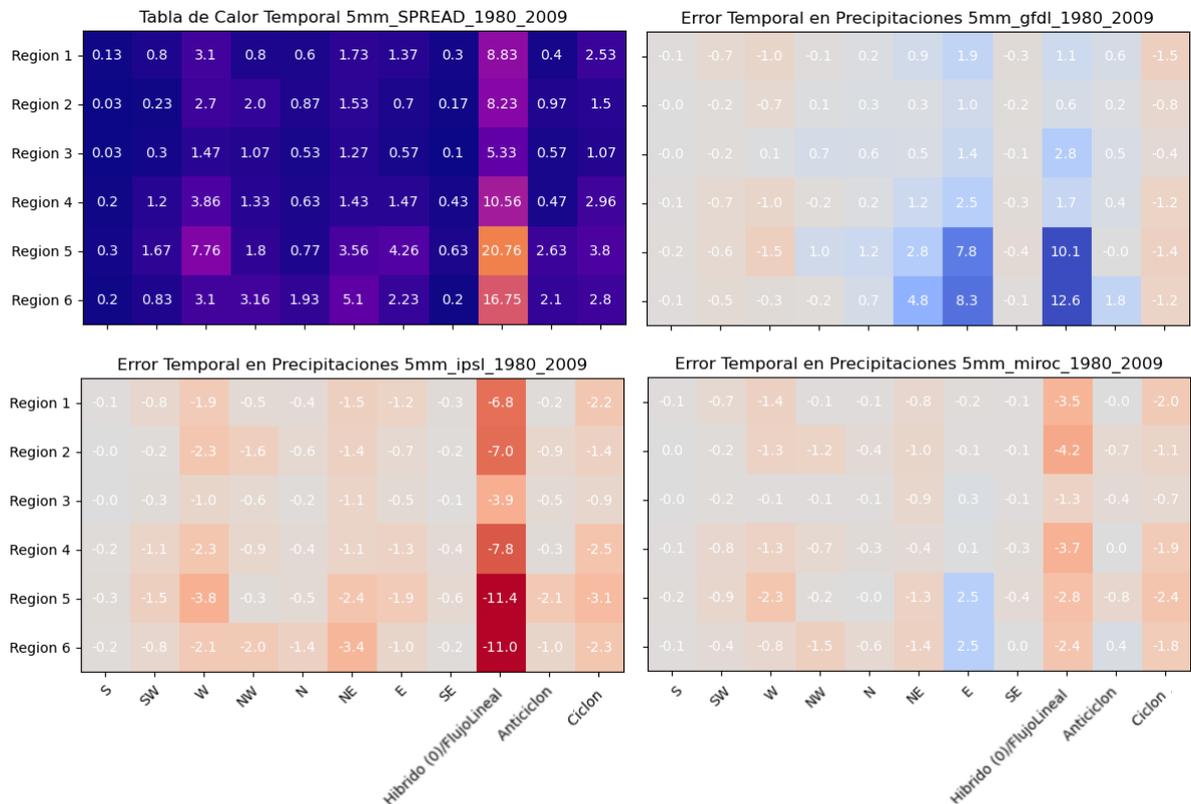


FIGURA 4.9: Tabla de calor con días anuales promedio de lluvia fuerte por cada WT y dirección predominante del viento

Para el modelo basado en IPSL, los mayores errores están en los WT híbridos y lineales, con un error de 11 días para las regiones 5 y 6 por debajo del SPREAD en las respectivas casillas de WTs.

Por último a pasado, podemos ver que la simulación que parte de los datos MIROC es la que menos destaca por tener colores vivos, y es que no tiene errores de más de tres

días para lluvia fuerte y no hay un error que destaque notablemente con respecto a las demás casillas.

4.4. Distribución de las precipitaciones a futuro

Ahora, vamos a repetir el mismo procedimiento en las bases de datos a futuro, lo que pasa es que esta vez, las tablas de calor a futuro las vamos a comparar con las mismas bases de datos de los modelos climáticos a pasado, y como estamos trabajando con predicciones entre pasado y futuro, ahora nos estaremos refiriendo a cambios en vez de a errores. Además, ahora estaremos utilizando las bases de datos de cada simulación climática regional para los dos escenarios de gases de efecto invernadero RCP-4.5 y RCP-8.5 y los dos periodos a futuro (2030-2059 y 2070-2099).

Así, para el modelo basado en GFDL, como podremos ver en la figura 4.10, independientemente de la región, en las tablas de calor general hay un mayor porcentaje de lluvias para vientos de Este que para las demás, seguido por los vientos de Noreste y Oeste por detrás y la componente anticiclónica comprende igual o más precipitaciones que la ciclónica según la región.

En cuanto a los cambios de precipitaciones a futuro, entre 2030 y 2059, independientemente del escenario (RCP-4.5 o RCP-8.5) podemos ver que hay un claro cambio de alrededor de dos a siete unidades por debajo de la tabla del pasado reciente para las direcciones de viento Oeste, Noroeste y Norte, en cambio hay un error de entre dos a once unidades por encima del pasado para vientos de Este y Sureste. Se puede ver que para el escenario RCP-4.5 el porcentaje de precipitación por vientos mencionados anteriormente son ligeramente menores. En cuanto a los WTs, también independientemente del escenario al que nos refiramos, las diferencias de lluvia en cuanto a componente anticiclónico y ciclónico son negativas.

En resumen, podemos ver que claramente para este modelo y para los períodos 2030-2059 y 2070-2099, como para cualquiera de los escenarios, en todas las tablas de calor se llega a la conclusión de que habrá notablemente menos lluvias para vientos del Oeste, y que habrán más lluvias del Este. También podemos ver que para los períodos entre 2070 y 2099, en el escenario RCP-8.5 se predicen notablemente menos lluvias para la componente ciclónica. Ahora, vamos a ver y comentar las tablas de calor temporales a futuro para este modelo.

En la figura 4.11 podemos ver que a pasado en este modelo se han predicho muchos más días de lluvia para las direcciones de viento Este y Noreste que para las demás direcciones, independientemente de la región en la que nos encontremos. Además, en este modelo hay notablemente más días de lluvia para componente anticiclónica que en la ciclónica.

En cuanto a los diferencias de días promedio anuales de lluvia entre pasado y futuro, podemos ver que donde hay más diferencia visualmente, es en la tabla de 2070

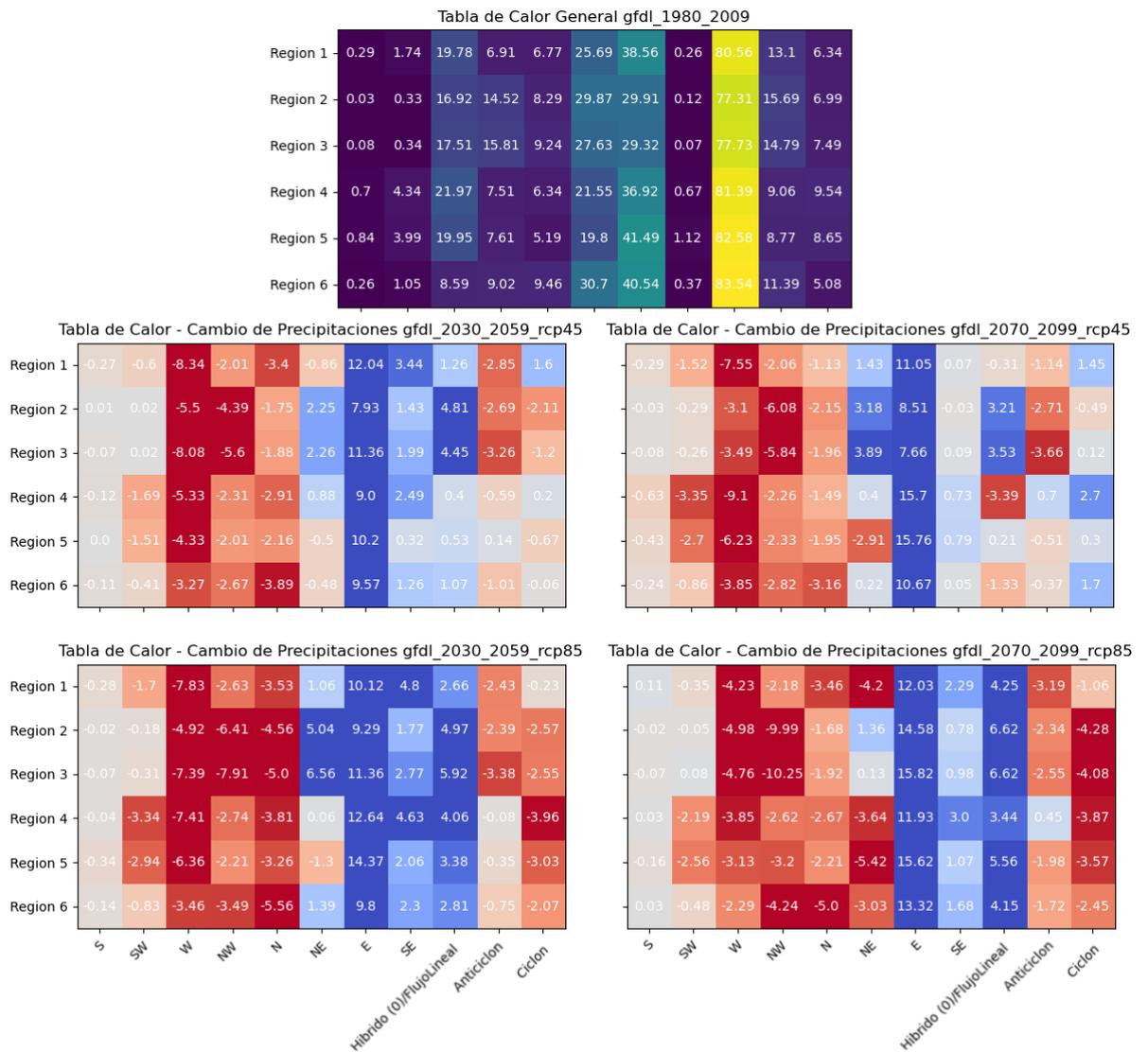


FIGURA 4.10: Tablas de calor de porcentaje de lluvias a futuro para el modelo GFDL

a 2099 para el escenario RCP-8.5, que corresponde al mayor cambio de gases de efecto invernadero, donde podemos ver una disminución notable de días de lluvia en general, y especialmente para el viento del Noreste en las regiones 1, 4, 5 y 6. Sin embargo para las regiones 2 y 3 (Fuerteventura y Lanzarote) no hay un cambio notable, esto podría ser porque los Alisios no tienen tanta influencia por el relieve más llano de esta región. También podemos ver que para este escenario y período concretos hay considerablemente menos días de lluvia para el componente anticiclónico, híbrido y lineal del clima.

Es interesante ver que para el mismo período, en el escenario RCP-4.5, este modelo predice 5 días promedio anuales más de lluvia para las regiones 2 y 3 en el componente Noreste del viento. También esta simulación predice ligeramente más días de lluvia para la componente Este del viento, independientemente de la región

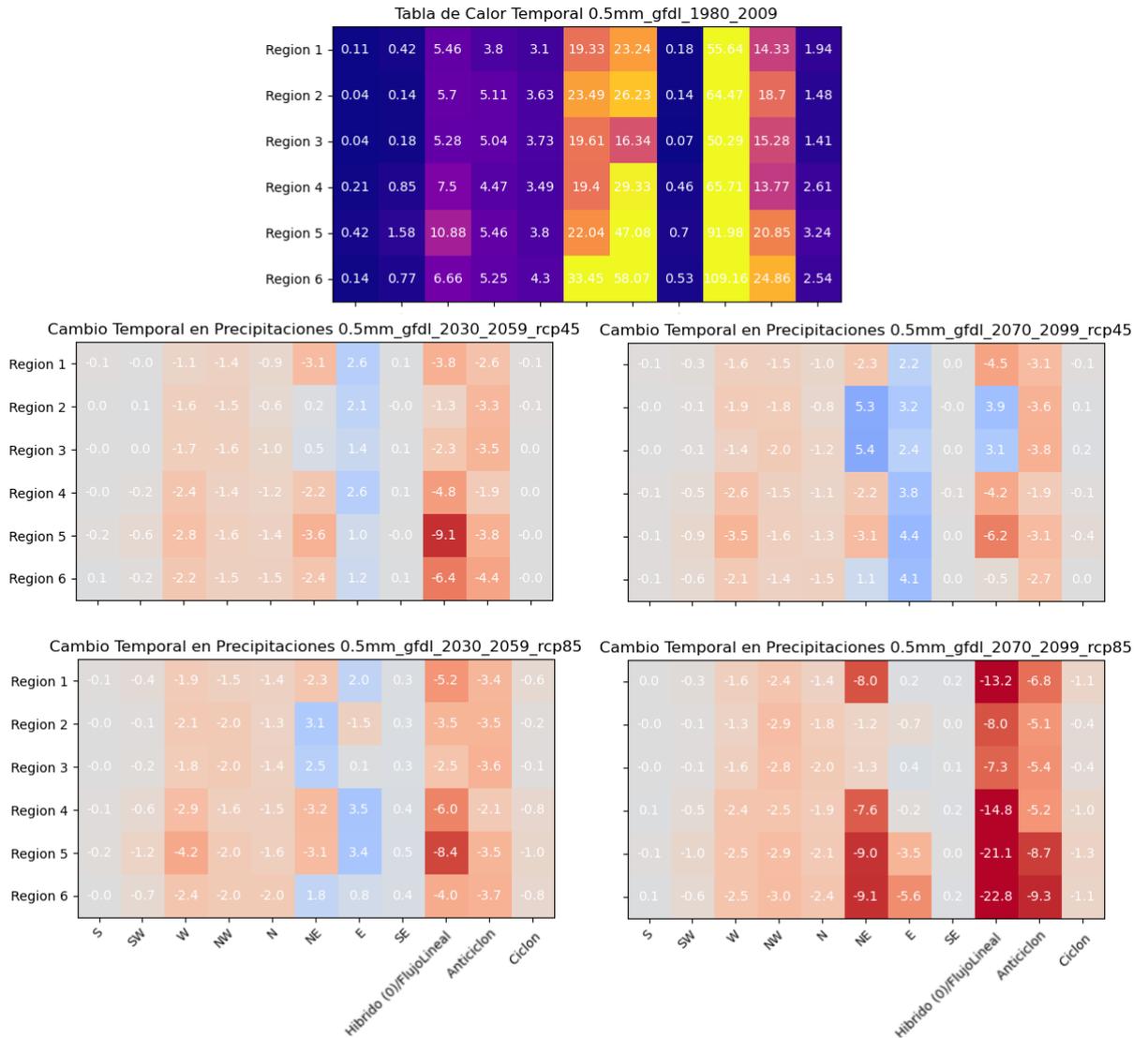


FIGURA 4.11: Tablas de calor temporales de lluvias estándar a futuro para el modelo GFDL

donde nos encontremos.

Con lo que respecta a las demás casillas de las tablas de calor restantes, excepto por alguna que otra casilla aislada, no vemos diferencias importantes en días de lluvia. En conclusión, donde hay más diferencias de días de lluvia será para el período 2070-2099 en el escenario RCP-8.5, donde podemos observar notablemente menos lluvias para ciertos WTs y direcciones del viento, como hemos explicado en el párrafo anterior.

A continuación, comentaremos los resultados a futuro para lluvias fuertes (>5mm), mostrados en la figura 4.12. Primeramente, podemos ver que la predicción de lluvias fuertes para este modelo tiene una gran concentración para tipos de tiempo lineales en las regiones 5 y 6, concentrándose en los vientos de Noreste y Este, en

cuanto a las demás regiones, también tienen una componente notable de lluvias fuertes para WT lineal, donde la gran mayoría de días se concentran en las direcciones Oeste, Noroeste, Este y Noreste, excepto para las regiones 2 y 3, en los que la dirección Norte del viento contribuye con un día promedio anual de lluvias fuertes.

En cuanto a las diferencias de lluvia fuerte a futuro para este modelo, podemos ver que para los dos escenarios RCP a período 2030-2059, las predicciones de este modelo en concreto coinciden en que el número de días de lluvia fuerte por vientos desde la columna Sur hasta Noreste serán ligeramente menores al período 1980-2009, acentuándose este cambio en las regiones 5 y 6, donde este cambio variará de alrededor de un día a dos menos de lluvia fuerte para cada una de las direcciones Oeste, Noreste, Norte, Noreste. En cambio, para la componente de viento Este se predice un aumento de hasta dos días de lluvias fuertes.

Para el período 2070-2099 podemos ver que se predice que los días de lluvia por WT lineal disminuyen para los dos escenarios, siendo esta disminución más acentuada para el escenario RCP-8.5. También podemos ver el patrón de las tablas de 2030-2059 donde los días de lluvia fuertes son menos para las direcciones Oeste, Noroeste, Norte, y Noreste del viento y un aumento de estos días en la dirección Este con respecto al período 1980-2009 (refiriéndonos a las regiones 5 y 6). Este cambio se acentúa en el escenario RCP-8.5

Entre otras cosas, podemos ver que del período 2030-2059 al 2070-2099 para el escenario RCP-4.5 hay un cambio notablemente más ligero que para el escenario RCP-8.5

Ahora, realizamos el mismo procedimiento para las simulaciones que toman como condiciones de contorno los datos del modelo climático IPSL. Primero, comentaremos las tablas de calor de porcentajes de lluvia por WT y dirección predominante del viento que podemos encontrar en la figura 4.13.

Lo primero que podemos observar de las tablas de calor es que hay un gran porcentaje de lluvias para WTs lineales con viento predominante del Oeste, Noroeste, Este y Noreste, según la región también podemos ver que hay más porcentaje de un viento que de otro. Además, también podemos ver que hay más porcentaje de lluvia por WT anticiclónica que por ciclónica, independientemente de la región a la que nos refiramos.

En cuanto a las tablas de calor de los cambios de porcentajes por WT y dirección de viento a futuro, podemos ver que para el escenario RCP-4.5 independientemente del período 2030-2059 o 2070-2099 hay un cambio negativo importante para las componentes de viento Oeste y Noroeste y un aumento importante de porcentaje de lluvias caídas por dirección Noreste-Este del viento según la región a la que nos refiramos. Así por encima, también podemos ver que para 2030-2059, RCP-4.5 hay un claro descenso de porcentaje de lluvia debido al componente noroeste del viento para todas las regiones, en cambio, para este mismo escenario, de 2070 a 2099, se predice

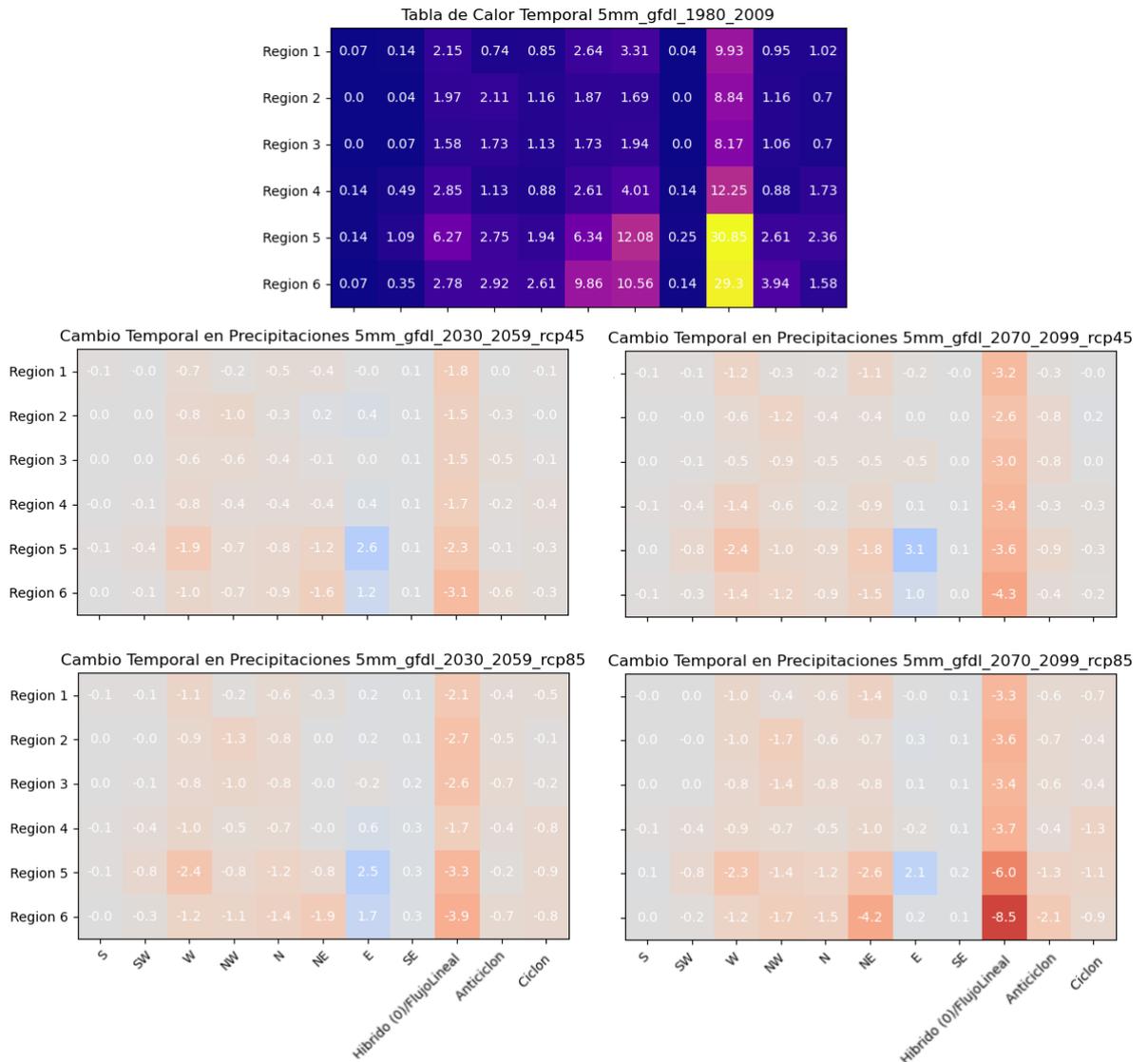


FIGURA 4.12: Tablas de calor temporales de lluvias fuertes a futuro para el modelo GFDL

para este modelo un descenso notable para los vientos Oeste, Noroeste y Norte y un claro aumento en lluvias para componentes Noreste y Este en todas las regiones, también vemos un claro descenso en precipitaciones tanto de componente ciclónica como anticiclónica, acentuado de mayor o menor manera depende de la región en la que nos encontremos.

En la tablas temporales de calor de la figura 4.14 podemos ver tenemos más de 7 días promedio de lluvia estándar anuales para las componente Este y Noreste del viento según la región. Además, resumidamente, podemos ver que la gran parte de estos días promedio de lluvia estándar se reparte entre WTs híbrido, lineal y anticiclónico.

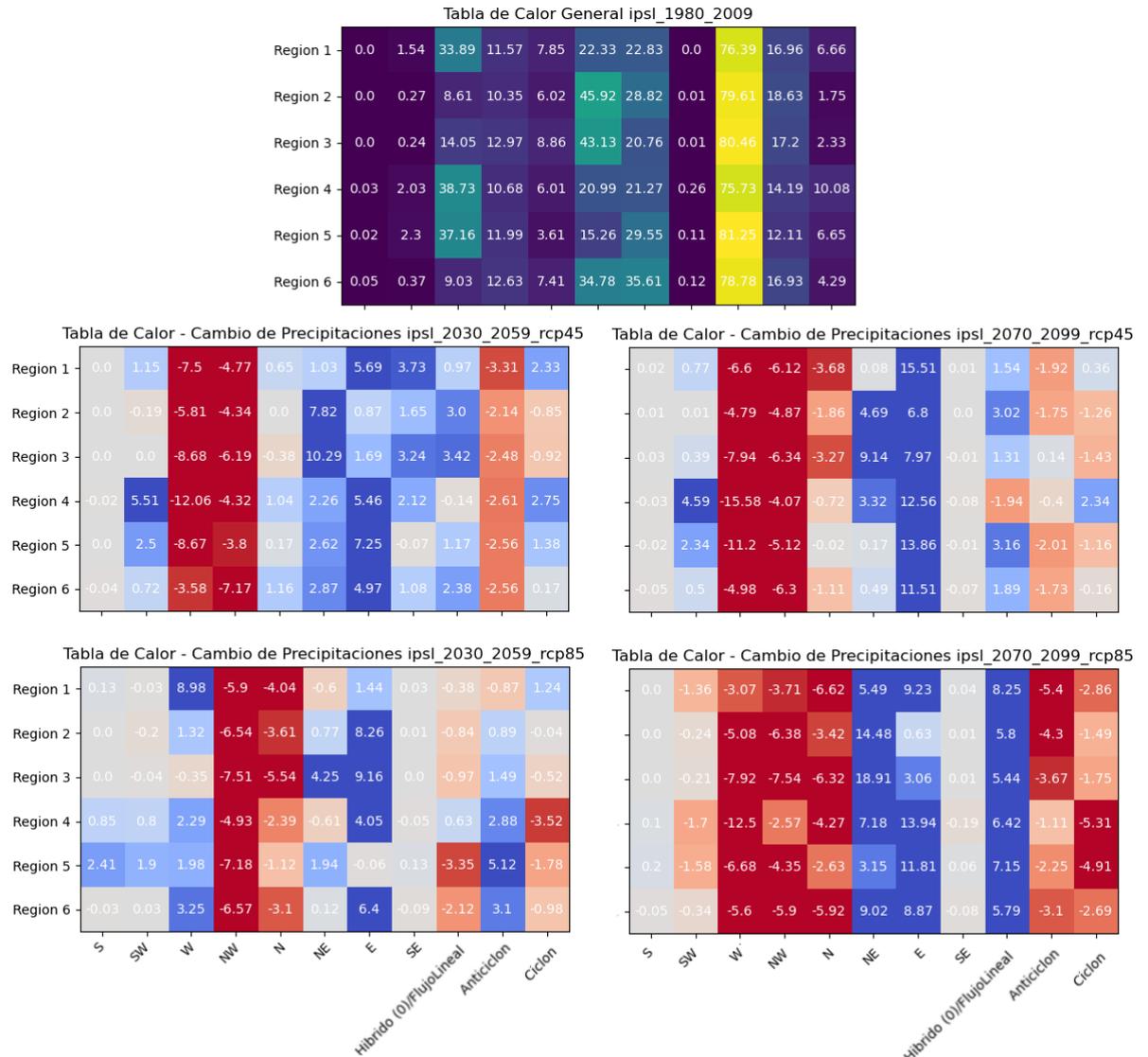


FIGURA 4.13: Tablas de calor de porcentajes de lluvias a futuro para el modelo IPSL

Respecto a los cambios de las tablas de calor a futuro, podemos ver que en cuanto a direcciones de viento, hay cuatro casillas con colores más vivos a las demás, es decir, las casillas que más tienen diferencia con respecto a la tabla de calor IPSL, 1980-2009. Estas casillas corresponden a Noreste y Este en las regiones 2 y 3, donde se ve un claro aumento de los días de lluvia estándar predichos. Este cambio se ve más acentuado para el escenario RCP-8.5 entre los años 2070 y 2099. En estas regiones también hay un aumento claro de estos días para los WT lineal e híbridos. También lo que podemos ver es que para las regiones 4, 5 y 6, hay un ligero descenso de los días de lluvia para las situaciones anticiclónicas.

A continuación, vamos a comentar las tablas de la figura 4.15 , que es el cambio de

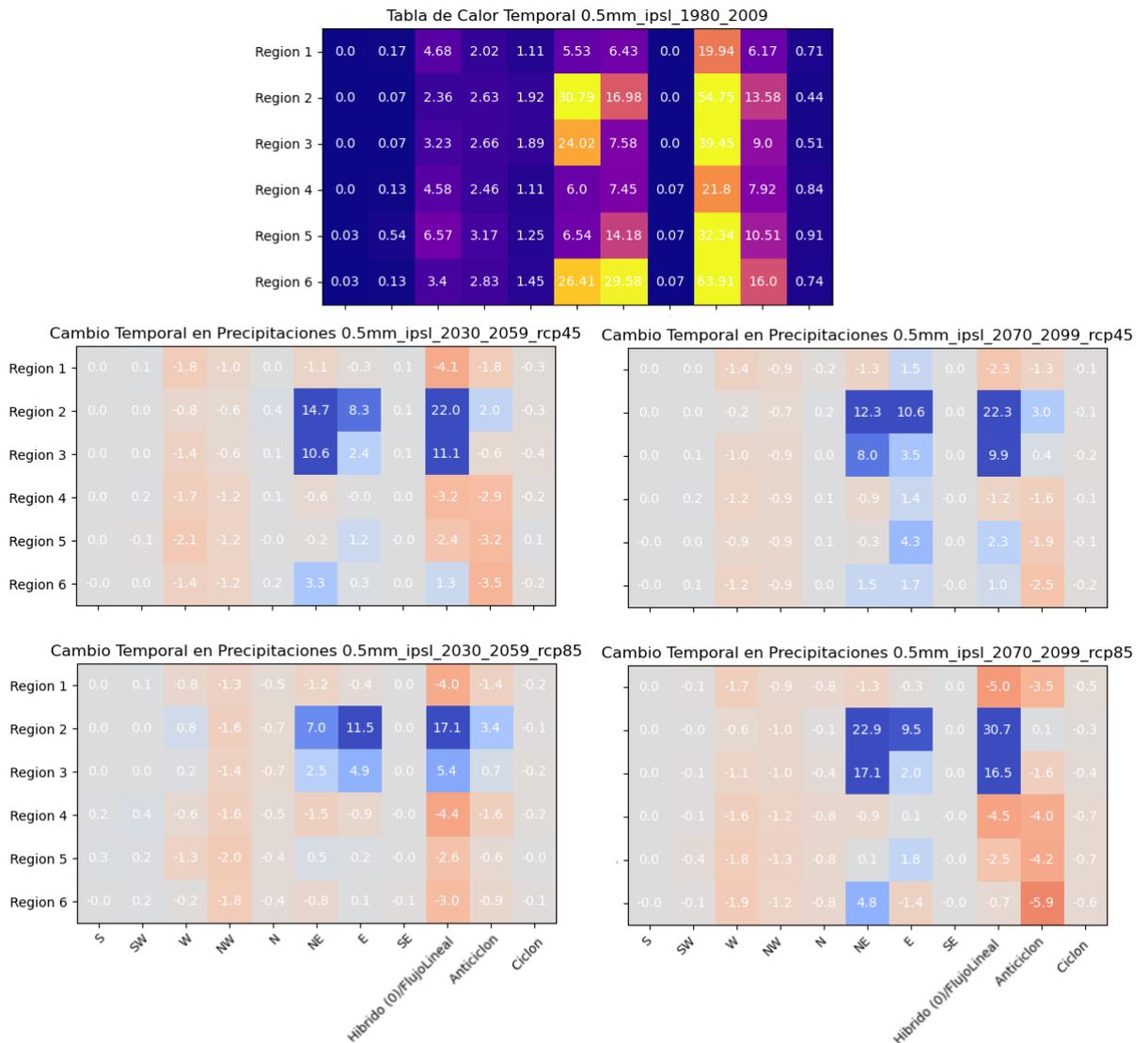


FIGURA 4.14: Tablas de calor temporales de lluvias estándar a futuro para el modelo IPSL

la predicción del número de días promedio anuales de lluvia fuerte por WT y por dirección predominante del viento según los resultados usando el modelo climático IPSL.

En ésta podemos ver que los pocos días promedio anuales de lluvias fuertes se concentran en gran parte en los tipos lineal e híbrido, teniendo más concentración de lluvias fuertes las regiones 5 y 6, y notablemente más peso las direcciones predominantes de viento de dirección Oeste-Noroeste y Este-Noreste.

En cuanto a las diferencias de las tablas de calor temporales de la parte inferior, vemos que no destacan los colores vivos, debido a que no hay gran diferencia de días promedio anuales donde se producen lluvias fuertes entre 1980-2009, 2030-2059 y

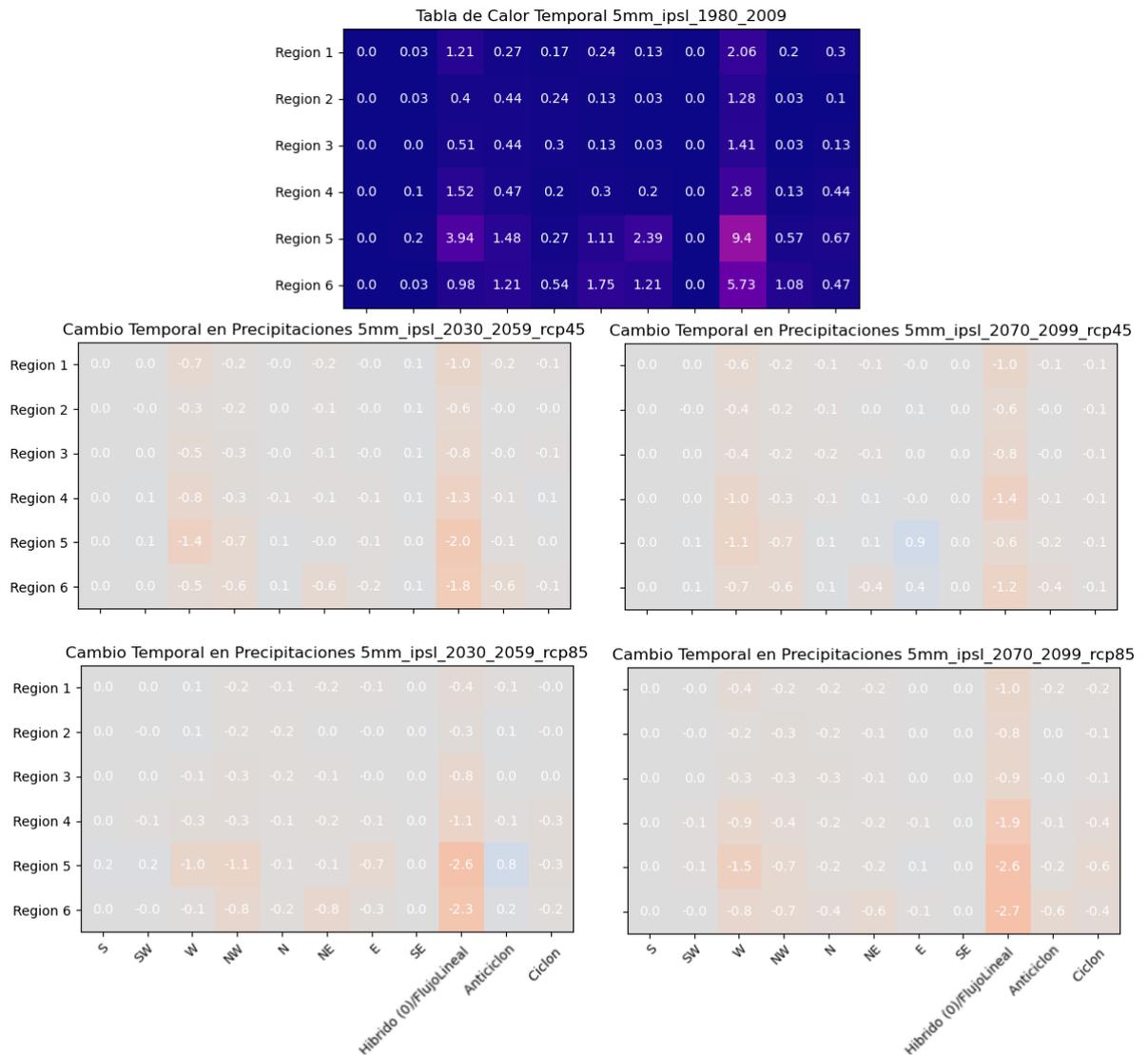


FIGURA 4.15: Tablas de calor temporales de lluvias fuertes a futuro para el modelo IPSL

2070-2099, independientemente del escenario al que nos refiramos.

Si en algo nos podemos fijar es que para el período 2030-2059, para los dos escenarios RCP, hay un descenso de días de lluvia fuerte para las regiones 5 y 6 en clima híbrido/lineal. Estas casillas, para el período 2070-2099, se mantienen con esta diferencia para la predicción del RCP-8.5, sin embargo, esta diferencia se reduce considerablemente para el escenario RCP-4.5, lo que se puede referir una estabilización de los días de lluvia fuerte para este WT y regiones concretos en el escenario RCP-4.5

Por último, vamos a examinar por el mismo procedimiento las tablas de calor generadas por las simulaciones que emplean el modelo climático MIROC como

condiciones de contorno. Primero, empezamos con las tablas de calor de porcentaje de lluvia anual total caída debido a un cierto WT o dirección del viento en caso de que el WT correspondiente sea lineal, o híbrido, los cuáles podemos encontrar en la figura 4.16.

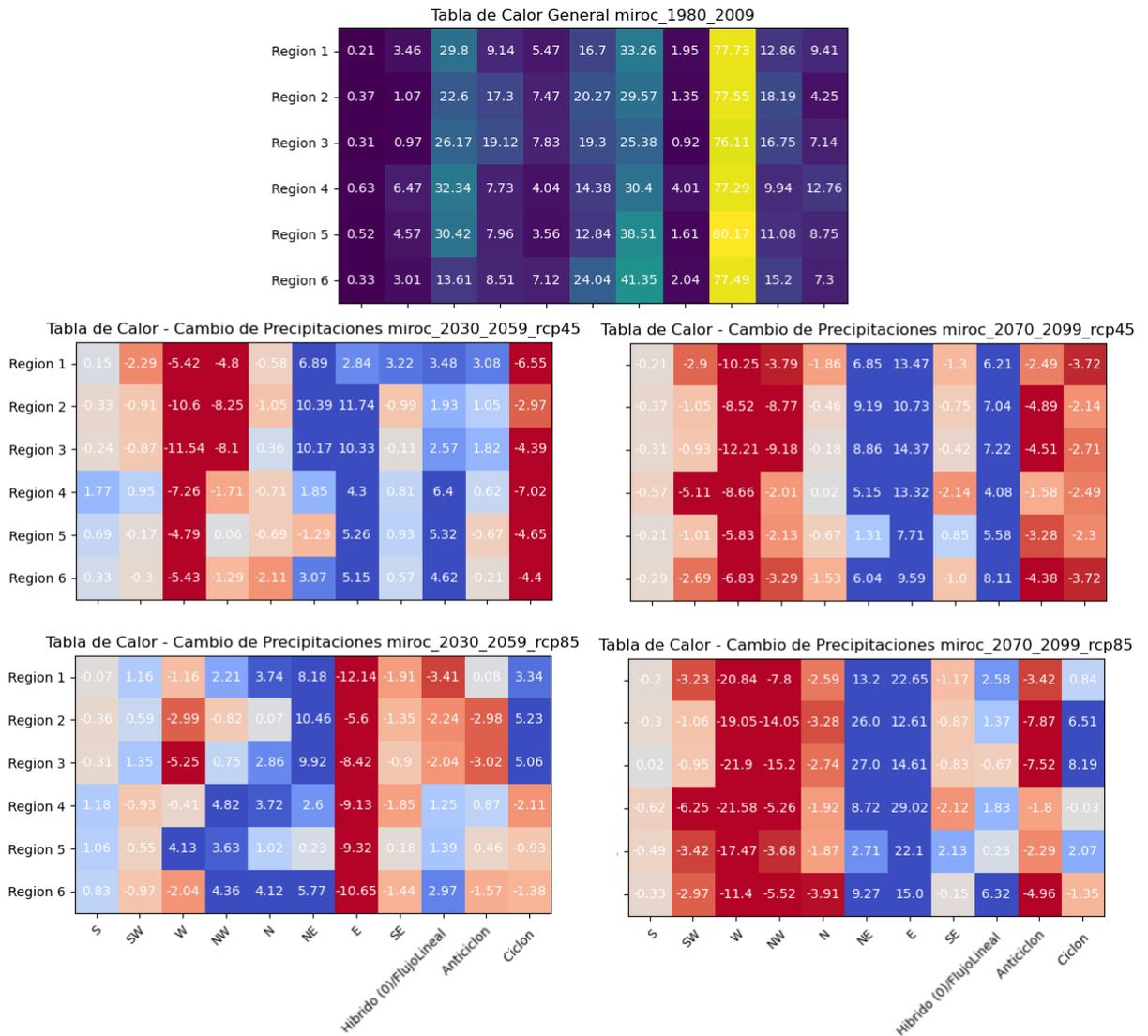


FIGURA 4.16: Tablas de calor de pocentaje de lluvias a futuro para el modelo MIROC

Podemos ver que para las tablas de calor general, tenemos un fuerte porcentaje de lluvias debido a vientos provenientes del Noreste, Este y Oeste, más o menos para todas las regiones que estamos estudiando. En cuanto a los WTs, el WT que alberga más cantidad de lluvia es el híbrido/lineal, seguido por el anticiclónico, y por último, está el WT ciclónico.

Para las tablas de calor en las que se muestran los cambios en precipitaciones a futuro, vemos que para el escenario RCP-4.5 en los períodos 2030-2059 y 2070-2099 el

porcentaje de lluvias disminuye notablemente por vientos de componente Oeste y aumenta por componentes Noreste y Este y por WT lineal e híbrido. Los dos períodos para este escenario en concreto coinciden en que la componente ciclónica disminuirá su porcentaje en lluvias de aquí al futuro según las predicciones.

Para el escenario RCP-8.5 vemos claramente que para el período 2030-2059 hay un claro aumento en precipitaciones para vientos de componente Noroeste-Norte-Noreste y un claro descenso para Este, la magnitud de estas diferencias dependerá de la región. También podemos destacar entre otros un aumento de lluvias de componente ciclónica para las tres primeras regiones.

Para este mismo escenario, en el período 2070-2099 hay un muy notable descenso de lluvias con viento de componente Oeste-Noroeste y un aumento en las componentes Noreste-Este, y entre otros, un claro descenso de porcentaje para WT anticiclónica, la intensidad de este descenso, dependerá de la región.

En la tablas de días de lluvia de la figura 4.17 podemos observar que gran parte de los días de lluvia están concentrados en vientos de dirección Este y Noreste, además, podemos ver que hay también una gran parte de estos días que corresponden a WT híbrido/lineal, y por último, también podemos ver que hay considerablemente más días anuales promedio de lluvia de WT anticiclónico que ciclónico.

Para las tablas de cambios temporales, en el período de 2070-2099 podemos ver que se predicen diferencias considerables en días en los que llueve debido a WT híbrido/lineal y anticiclónico, por arriba o por debajo según la región (como podemos ver visualmente en las tablas), y más acentuado para el escenario RCP-8.5

Para el período 2030-2059, podemos ver que para el WT híbrido/lineal en las regiones 2 y 3 hay un aumento de días, más acentuado para el RCP-8.5. También es visible este aumento para las mismas regiones debido a la componente Noreste del viento.

Por último, para la tabla RCP-8.5, en las regiones 4, 5 y 6 vemos una ligera disminución por encima de lo normal de cantidad de días de lluvia.

Ahora, vamos a comentar la figura 4.18, que representa los días de lluvia fuerte promedio anuales para cada WT y dirección de viento predominante para el modelo MIROC.

Lo que primero podemos observar en las tablas de calor temporal es que hay una gran componente de lluvias fuertes debida a la condición híbrido/lineal, en concreto de componentes de viento Oeste, Noreste y Este ligeramente por encima de las demás direcciones.

Las tablas de calor de los cambios temporales para los años 2030-2059 coinciden con una ligera disminución de días de lluvia fuerte para situaciones híbrido/lineal. En el escenario RCP-4.5 se ve más acentuado este descenso de días, para el escenario RCP-8.5 en cambio, se ven ligeramente menos días de lluvia de componente Este para

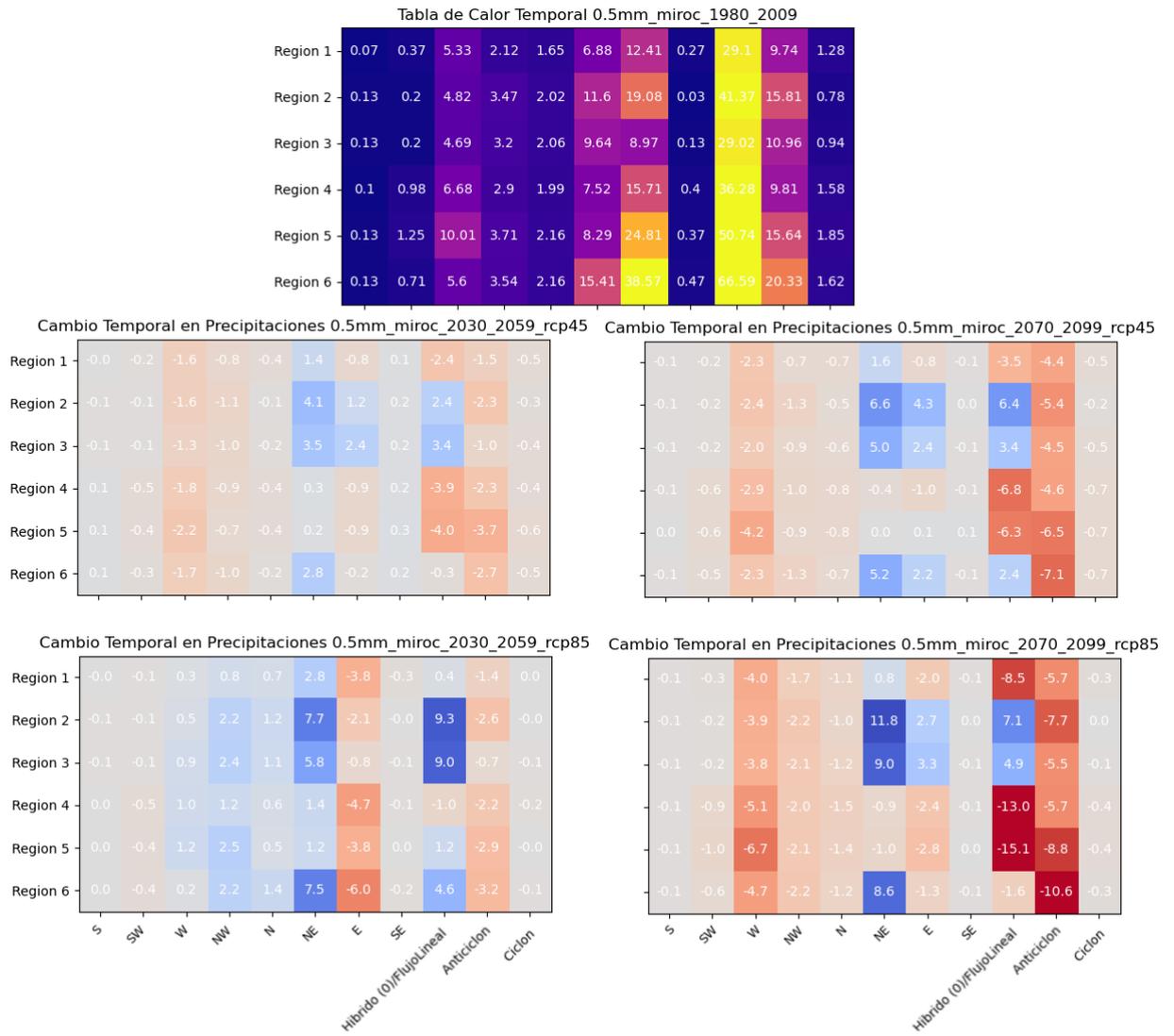


FIGURA 4.17: Tablas de calor temporales de lluvias estándar a futuro para el modelo MIROC

las regiones 5 y 6. Los demás cambios esperados son mucho menores. Para el período 2070-2099 vemos este descenso en situaciones híbridas/lineales, pero esta vez este descenso está más acentuado por el escenario RCP-8.5, también podemos ver este mismo descenso más ligero en días de lluvia fuerte por componente de viento Oeste para las tres últimas regiones, como antes, más acentuado en la tabla de calor correspondiente al RCP-8.5

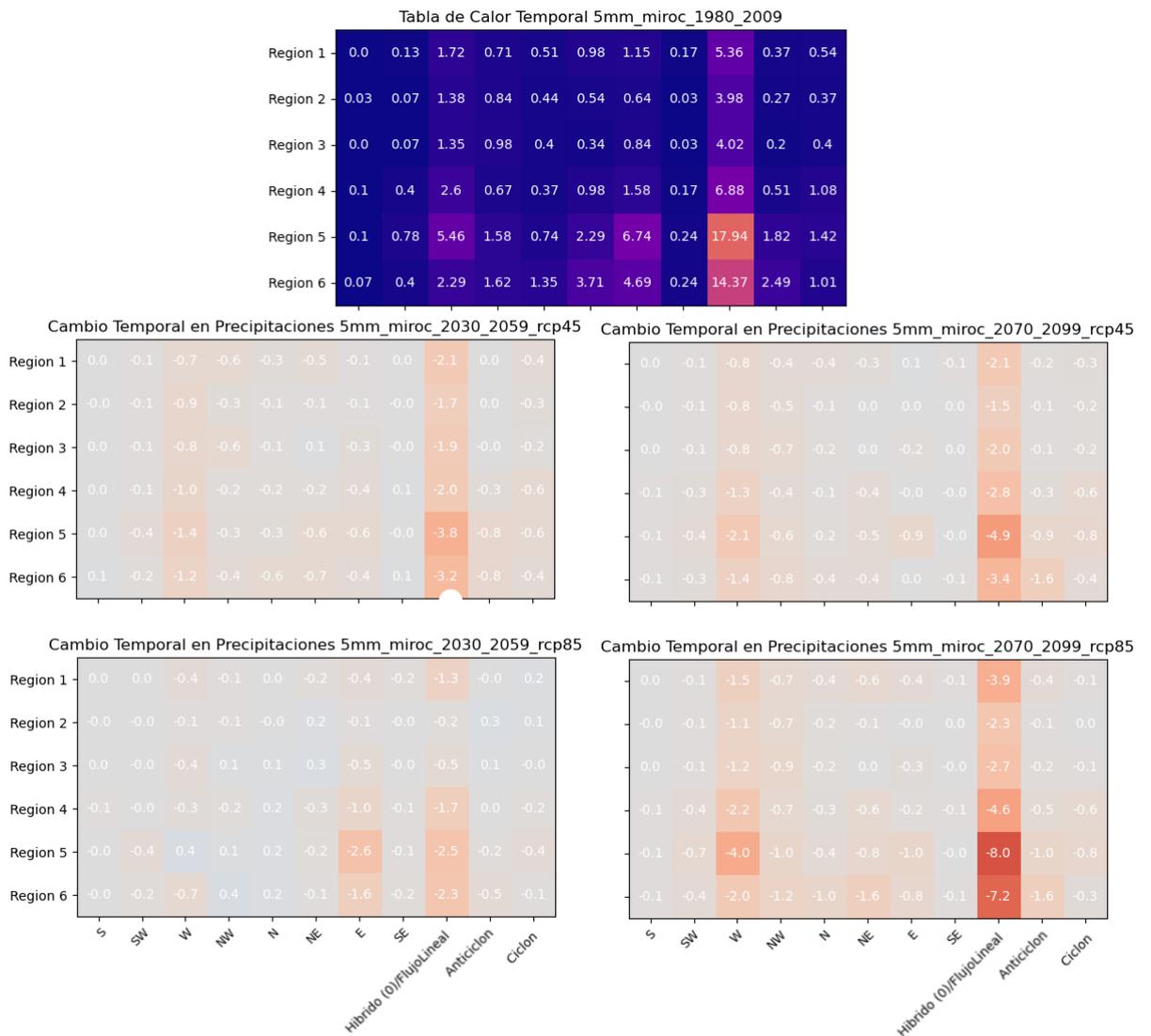


FIGURA 4.18: Tablas de calor temporales de lluvias fuertes a futuro para el modelo MIROC

Capítulo 5

Discusión y conclusiones

A continuación, expondremos las conclusiones que hemos obtenido a partir del análisis realizado en el apartado de *Resultados* y también haremos un comentario sobre cómo podríamos avanzar en estudios futuros relacionados a este trabajo.

We will now present the conclusions we have drawn from the analysis in the Results section and also comment on how we might move forward in future studies related to this work.

5.1. Características de la lluvia (observaciones)

De las tablas de calor presentadas en el apartado de *Resultados* podemos sacar las siguientes conclusiones para las observaciones de precipitación:

- El porcentaje más alto de precipitación anual se produce con flujos (lineal o híbrido) del oeste. La segunda contribución más importante viene de días con flujos NE y, luego E. En el norte de Tenerife y Gran Canaria el flujo del oeste es el tercero en importancia, por detrás de los otros dos.
- En todas las regiones el número de días de lluvia es mayor para la dirección NE. Junto con lo comentado en el apartado anterior, significa que las lluvias que se producen por flujos del oeste son más intensas. Incluso en las zonas norte de las islas centrales.
- En todas las regiones, excepto en el norte de las islas centrales, la mayor cantidad de días de lluvia intensa se producen bajo flujos del oeste.

5.2. Comparación de modelos frente a observaciones

Al haber estudiado la precisión de los modelos a pasado con respecto a las observaciones del SPREAD, podemos sacar las siguientes conclusiones a partir de las tablas de calor correspondientes:

- MIROC-ESM es la simulación que presenta menos error relativo respecto SPREAD, y por lo tanto, es el modelo en el que la distribución de precipitaciones en los distintos tipos de tiempo y direcciones se asemeja más a las observaciones.

- Las direcciones que presentan poca contribución a la lluvia total en las observaciones (S y SE) tienen aún menos contribución en las simulaciones.
- Todas las simulaciones subestiman el número de días de lluvia anuales producidos por flujos del oeste. Además, sobrestiman el número de días de lluvia con tiempo del NE y E, aunque de manera muy desigual en las distintas regiones, pero de forma clara en Lanzarote y Fuerteventura.
- La simulación basada en los datos de GFDL tiende a sobrestimar el número de días con lluvias fuertes, y las otras dos (basadas en IPSL y MIROC) tienden a subestimarlas.

5.3. Proyección a futuro

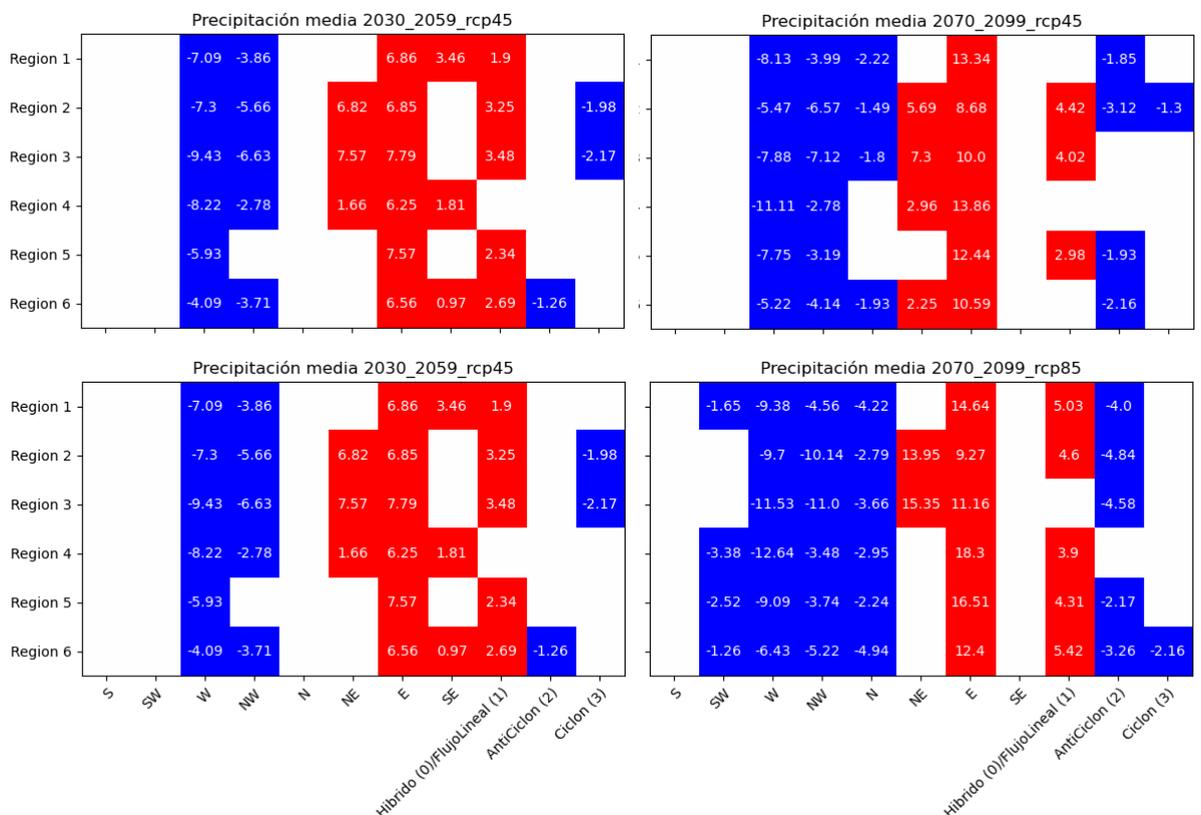


FIGURA 5.1: Media de cambios a futuro de los porcentajes de precipitación debidos a cada WT para las tres simulaciones de cada periodo y RCP. Sólo los datos con signo de cambio coincidente en las tres simulaciones son mostrados.

Por último, exponemos las conclusiones para las proyecciones a futuro. Las figuras 5.1, 5.2 y 5.3 representan la media para las casillas en las que los tres modelos tienden a ser positivas o negativas conjuntamente. Es decir, por ejemplo, para los porcentajes de lluvia, si para el período 2070-2099 las tres simulaciones coinciden en que en una casilla en concreto aumenta el porcentaje de precipitaciones, representaremos la media

de las tres simulaciones, si no es así, no se representará la casilla en cuestión.

Así, lo que podemos concluir viendo las figuras a futuro es:

- En la figura 5.1 podemos ver que las simulaciones basadas en los distintos modelos globales (GFDL, IPSL y MIROC) proyectan una disminución del porcentaje de lluvia debida a flujos del oeste (SO y O), aumentando el porcentaje de lluvia debida a flujos del NE y E. Esto se puede deber a la disminución clara del número de días de lluvia debidas a flujos de esas direcciones (SO y O), como se explica a continuación.

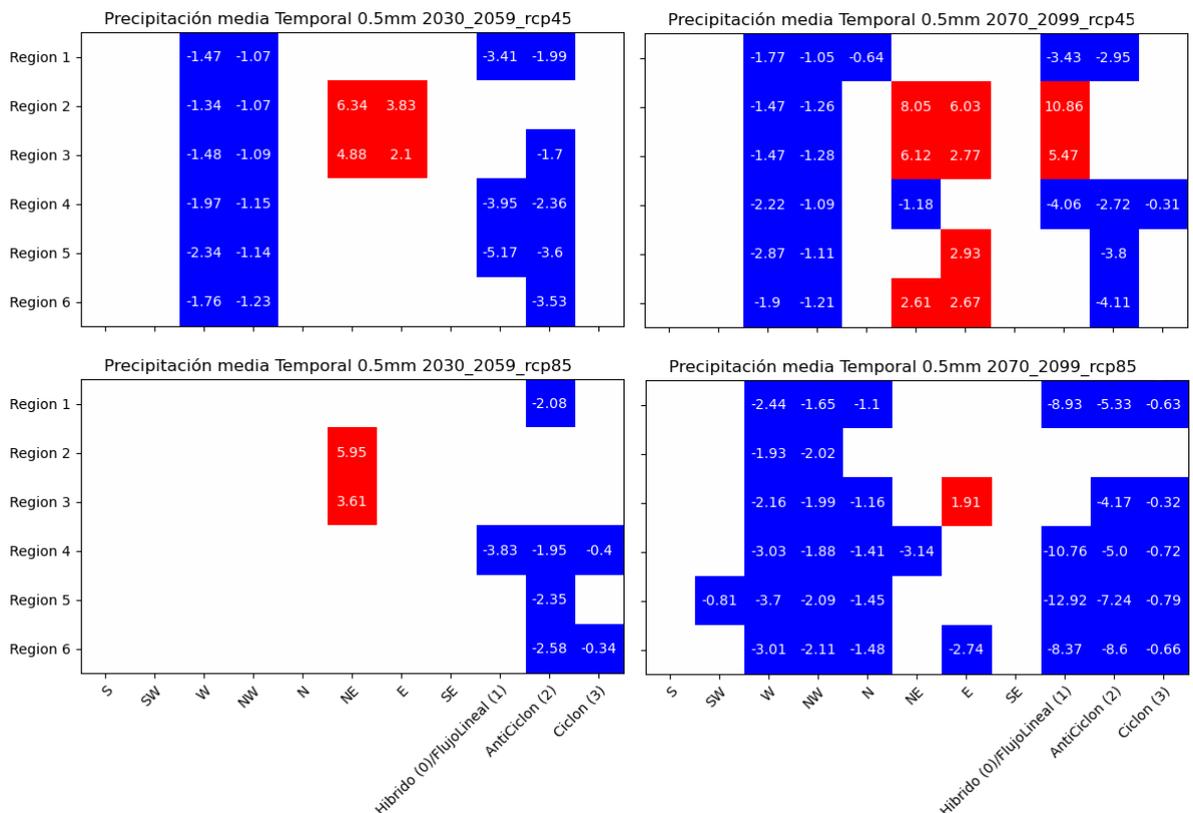


FIGURA 5.2: Media en cambio de días anuales con precipitación en casillas conjuntamente positivas y negativas entre todas las simulaciones

- En general, podemos ver en la figura 5.2 que todas simulaciones coinciden en que disminuirá el número de días de lluvia total para flujos provenientes del Oeste y Noroeste excepto para el escenario rcp-8.5 en el período de 2030 a 2059. También podemos ver que se estima una disminución de días totales de lluvia, sin importar el tipo de tiempo. Quizás con la excepción de Lanzarote y Fuerteventura para algunos tipos de tiempo y periodos futuros. Además, podemos observar que hay un aumento en el número de días de lluvia total para flujos de Este y Noreste según a que período, región y a que escenario RCP nos refiramos. De forma consistente sólo parece estimarse un aumento de días de precipitación con flujo de los alisios en Lanzarote y Fuerteventura a mitad de siglo y, de forma menos clara, a final de siglo..

- También se proyecta una disminución del número de días totales de lluvia fuerte, sobre todo para aquellos correspondientes a flujos del oeste, como podemos ver en la figura 5.3.

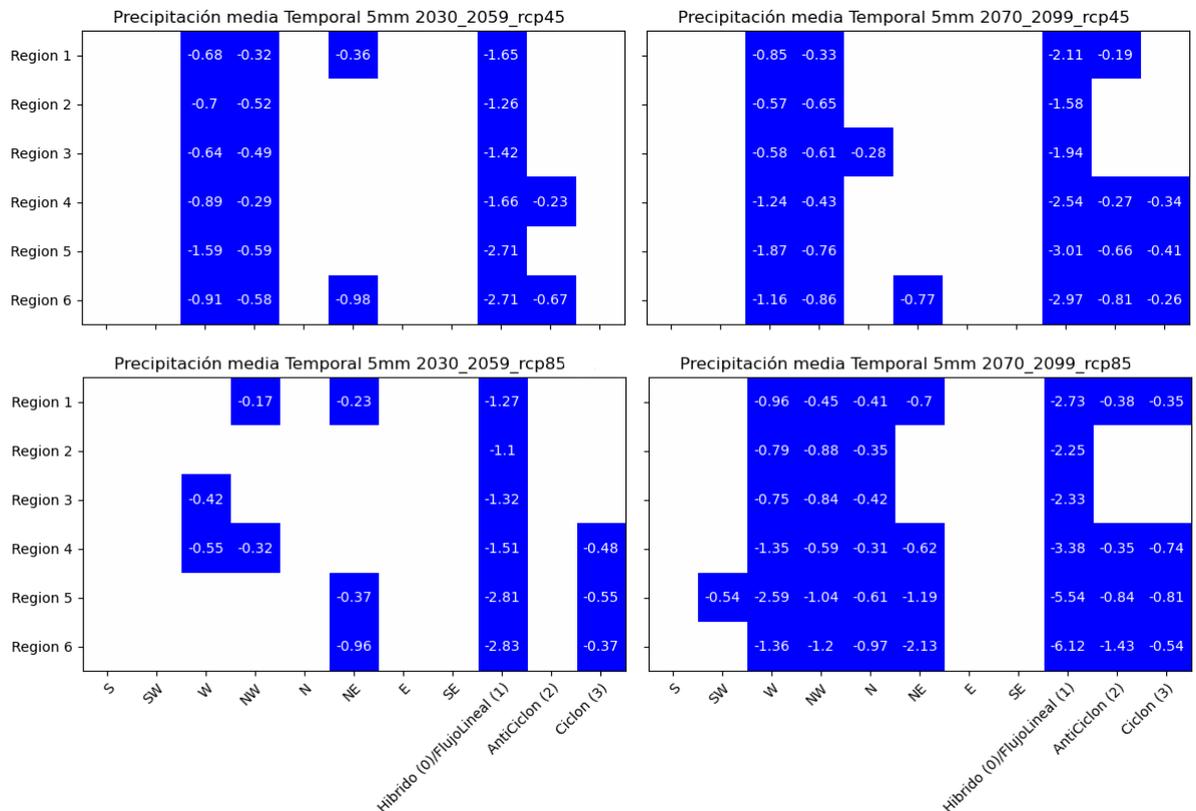


FIGURA 5.3: Media en cambio de días anuales con lluvia fuerte en casillas conjuntamente positivas y negativas entre todas las simulaciones

5.4. ¿Qué hacer ahora?

Comentaremos lo que podrían ser algunos puntos de partida sobre los que podrían basarse futuros estudios relacionados a este tema:

- Como hemos dicho en apartados anteriores, podemos ver una tendencia de descenso de lluvias de viento de dirección oeste, por ello, podríamos estudiar a qué se debe esto, si se debe a que tendremos menos frentes asociados a borrascas que lleguen a Canarias o si se debe a un desplazamiento del cinturón de borrascas, entre otros motivos posibles.
- Podríamos hacer un estudio con más detalle explicando el por qué de este aumento de lluvias en direcciones de Noreste y cercanas y este descenso a oeste y a direcciones cercanas, es decir, estudiando más a fondo estos patrones de lluvia.

- Podríamos añadir conceptos de inteligencia artificial para mejorar este estudio de patrones de lluvia, ya que estos conceptos están íntimamente relacionados con la estadística y sus aplicaciones, herramientas clave para este estudio en concreto.

Referencias

- Chen, Fei y Jimy Dudhia (2001). «Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity». En: *Mon. Weather Rev.* 129.4, págs. 569-585. DOI: [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, William D y col. (2004). *Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM 3.0)*.
- Dufresne, J.-L. y col. (mayo de 2013). «Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5». En: *Climate Dynamics* 40.9, págs. 2123-2165. ISSN: 1432-0894. DOI: [10.1007/s00382-012-1636-1](https://doi.org/10.1007/s00382-012-1636-1).
- Dunne, John P. y col. (2012). «GFDL's ESM2 Global Coupled Climate–Carbon Earth System Models. Part I: Physical Formulation and Baseline Simulation Characteristics». En: *Journal of Climate* 25.19, págs. 6646-6665. DOI: [10.1175/JCLI-D-11-00560.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00560.1).
- Expósito, Francisco J y col. (2015). «High-resolution future projections of temperature and precipitation in the Canary Islands». En: *Journal of Climate* 28.19, págs. 7846-7856.
- Hersbach, Hans y col. (2020). «The ERA5 global reanalysis». En: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 146.730, págs. 1999-2049. DOI: <https://doi.org/10.1002/qj.3803>. eprint: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/qj.3803>. URL: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/qj.3803>.
- Hong, Song-You y col. (2006). «A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes». En: *Mon. Weather Rev.* 134.9, págs. 2318-2341. DOI: [10.1175/MWR3199.1](https://doi.org/10.1175/MWR3199.1).
- Jones, P. D. y col. (2013). «Lamb weather types derived from reanalysis products». En: *International Journal of Climatology* 33.5, págs. 1129-1139. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.3498>.
- Lim, Kyo-Sun Sunny y Song-You Hong (2010). «Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate models». En: *Mon. Weather Rev.* 138.5, págs. 1587-1612. DOI: [10.1175/2009MWR2968.1](https://doi.org/10.1175/2009MWR2968.1).
- Pérez, JC y col. (2014). «Evaluation of WRF parameterizations for dynamical downscaling in the Canary Islands». En: *Journal of climate* 27.14, págs. 5611-5631.
- Revelle, William (2021). *psych: Procedures for Psychological, Psychometric, and Personality Research*. R package version 2.1.6. Northwestern University. Evanston, Illinois. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=psych>.
- Riahi, Keywan y col. (2017). «The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview». En: *Global Environmental Change* 42, págs. 153-168. ISSN: 0959-3780. DOI:

- <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378016300681>.
- Sánchez-Benítez, Antonio y col. (2017). «Revisiting precipitation variability, trends and drivers in the Canary Islands». En: *International Journal of Climatology* 37.9, págs. 3565-3576. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.4937>. eprint: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/joc.4937>. URL: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.4937>.
- Serrano-Notivoli, R., S. Begueria y col. (2017). «SPREAD: a high-resolution daily gridded precipitation dataset for Spain – an extreme events frequency and intensity overview». En: *Earth System Science Data* 9.2, págs. 721-738. DOI: [10.5194/essd-9-721-2017](https://doi.org/10.5194/essd-9-721-2017).
- Serrano-Notivoli, R., M. de Luis y col. (2017). «Spatially based reconstruction of daily precipitation instrumental data series». En: *Climate Research* 73, págs. 167-186. DOI: [10.3354/cr0147](https://doi.org/10.3354/cr0147).
- Serrano-Notivoli, Roberto y col. (2017). «An R package for daily precipitation climate series reconstruction». En: *Environmental Modelling and Software* 89, págs. 190-195. ISSN: 1364-8152. DOI: [10.1016/j.envsoft.2016.11.005](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.11.005).
- Watanabe, S. y col. (2011). «MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments». En: *Geoscientific Model Development* 4.4, págs. 845-872. DOI: [10.5194/gmd-4-845-2011](https://doi.org/10.5194/gmd-4-845-2011).