



---

**Universidad de Valladolid**

Facultad de Ciencias

## **TRABAJO FIN DE GRADO**

Grado en Física

**Estudio de la recirculación del aire en la Península Ibérica**

*Autor: Alejandro Beato de la Torre*

*Tutor/es: Isidro A. Pérez Bartolomé y M.ª Ángeles García Pérez*

# Índice

Resumen	3
Abstract	3
1. Introducción	4
2. Fundamentos teóricos	7
2.1. Recirculación	7
2.2. Estadísticos robustos	8
2.2.1. Mediana	8
2.2.2. Rango intercuartílico (IQR)	8
2.2.3. Índice de Yule-Kendall	8
2.2.4. Curtosis robusta	9
3. Descripción experimental	9
4. Resultados	15
4.1. Evolución anual	15
4.2. Distribución espacial	16
5. Conclusiones	23
6. Bibliografía	24
7. Anexo	27
Índice de gráficos y figuras	27

## Resumen

En este trabajo se ha hecho un estudio de cómo se comporta el aire en la península ibérica. Concretamente, se ha estudiado su recirculación, es decir, se ha seguido minuciosamente el recorrido del aire durante 24 horas. Para elegir los puntos de partida a tomar, se ha dividido la península en una red de localizaciones dada por las intersecciones de cada grado de latitud con cada grado de longitud.

En este estudio influyen muchas variables. Sus posiciones inicial y final, sus velocidades, la altura con respecto al suelo a la que se quiera hacer el estudio, etc. En este caso, siempre se ha elegido una altura de 500 m para la toma de puntos iniciales y luego se ha seguido el recorrido del aire hacia atrás en el tiempo, hora a hora, desde ese punto hasta 24 horas antes.

Para este propósito, se han recabado datos durante 4 años, desde el 2017 hasta el 2020. El tamaño de los datos recogidos es muy grande, así que, para su mejor tratamiento, se ha hecho uso de la estadística robusta para un análisis más plausible. Posteriormente, con estos datos, se han representado mapas de isolíneas y gráficos de cajas y bigotes.

Gracias a estos gráficos se ha podido comprobar que la zona de mayor recirculación del aire en la península corresponde con la costa mediterránea, pero sin llegar a recogerse valores altos en ningún punto del territorio.

## Abstract

In this research, a study of the behaviour of the air at the Iberian Peninsula has been made. Specifically, the study is about the air recirculation, it means, we have followed each air trajectory from a particular starting point until 24 hours later, wherever it finished. In order to choose all the starting locations, the peninsula has been split into a network of points given by the intersections of each degree of latitude with each degree of longitude.

This study is influenced by many variables. Their initial and final positions, their velocities, the height with respect to the ground at which the study is carried out, etc. In this case, we have always chosen a height of 500 m to take the initial points and then the air path has been followed backwards in time, hour by hour, from that point to 24 hours before.

For this purpose, data has been collected for 4 years, from 2017 to 2020. The size of the data collected is very large, so, for a better treatment, robust statistics have been used for a more plausible analysis. Subsequently, with this data, isoline maps and box and whisker plots have been represented.

These graphs show that the area of greatest air recirculation in the peninsula corresponds to the Mediterranean coast, but without reaching high values at any point in the territory.

# 1. Introducción

El objetivo de este trabajo es hacer un estudio en profundidad sobre el comportamiento del aire en la península ibérica, más concretamente, se estudia el parámetro de la recirculación. Para visualizar de manera rápida y concisa los resultados, se han representado en diferentes mapas y gráficos, que son el mejor método para ver con claridad un volumen tan elevado de datos.

La recirculación del aire puede ser considerada en los planos vertical u horizontal. Distintos estudios sugieren que los procesos de recirculación vertical pueden reforzar o estar vinculados a episodios de contaminación. Este es el caso de los altos valores de ozono que, en Madrid, se ven enriquecidos por la circulación vertical del aire debido a las condiciones orográficas (Querol et al., 2018). También la orografía del valle del Guadalquivir es la responsable de la recirculación vertical de las masas de aire que determinan la acumulación de la concentración del ozono de fondo (in't Veld et al., 2021; Massagué et al., 2021). Sin embargo, la mayor parte de los estudios sobre la recirculación del aire consideran la recirculación en el plano horizontal, en concordancia con la tendencia del movimiento del aire en la atmósfera.

La recirculación del aire se puede cuantificar mediante el factor de recirculación, que fue introducido por Allwine y Whiteman (1994) junto con las cantidades para describir los potenciales de estancamiento y ventilación. Su rango se extiende de cero a uno. Cuanto mayores son la recirculación y/o el estancamiento, menor es la ventilación, con el consiguiente efecto sobre las concentraciones registradas. Algunos análisis, como el de Venegas y Mazzeo (1999), estudiaron estos tres potenciales, el estancamiento, la recirculación y la ventilación, en cinco ciudades de Argentina. En dos de ellas, los eventos de recirculación se acercaron al 10% del tiempo y se asociaron a la brisa tierra-mar en un caso y a la complejidad del terreno en otro, que facilitó las circulaciones locales. También Nankar et al. (2009) estudiaron la frecuencia de situaciones de estancamiento, recirculación y ventilación en la central atómica de Kakrapar, en India. En general, las frecuencias del estancamiento y la recirculación fueron, cada una de ellas, la mitad que la de ventilación. Pérez et al. (2011) relacionaron las concentraciones de CO<sub>2</sub> en un emplazamiento rural con los tipos de flujo y encontraron que las concentraciones más bajas correspondieron a la ventilación, siendo las de la recirculación ligeramente inferiores a las del estancamiento. Kumar et al. (2013) analizaron los tres potenciales en el emplazamiento de una central nuclear. El porcentaje de tiempo correspondiente a la recirculación fue el menor, 19.5%, mientras que los porcentajes de estancamiento y ventilación fueron similares.

En algunas ocasiones, la recirculación del aire se debe al patrón sinóptico. Este es el caso de Conradie et al. (2016), quienes valoraron cualitativamente la circulación anticiclónica del aire en cuatro sitios de medida en Sudáfrica en los que se tomaron muestras de deposición seca. Con frecuencia y alternativamente, la recirculación se ha asociado a desplazamientos locales del aire, como es el caso de las brisas. Levy et al. (2009) analizaron el potencial de recirculación en el este del Mediterráneo y el efecto combinado de las recirculaciones sinópticas y de mesoscala en la dispersión de un penacho. El alto potencial de recirculación del emplazamiento estuvo justificado por la interacción entre las superficies de tierra y mar y la orografía, determinada por la curvatura de la bahía y una montaña. Además, la brisa mar-tierra propició recirculaciones inferiores a un día, con lo que las parcelas de aire pasaron hasta tres veces por el mismo lugar. Otro ejemplo es el del análisis de Wang et al. (2018), quienes estudiaron la contaminación por ozono en el mar del sur de China y, en ocasiones, una contaminación importante de ozono

recirculó, por la brisa, cerca de la costa, lo que condujo a agravar la contaminación en las ciudades costeras. Crumeyrolle et al. (2019) midieron las partículas materiales en Senegal y además calcularon los factores de recirculación en dos situaciones de brisa, una en condiciones típicas de Harmattan y otra de Harmattan con polvo del desierto. En ambos casos, los factores de recirculación fueron altos. Pero, antes del establecimiento de la brisa, se observó un estancamiento que condujo a altos valores en las concentraciones de aerosoles finos ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ) en el caso del estancamiento sobre el mar (debido al aerosol marino y fuentes antropogénicas), mientras que esta contribución es menor cuando el estancamiento ocurre sobre la costa con eventos de polvo del desierto. Otra situación es la recirculación propiciada por accidentes orográficos. Este es el caso del análisis de Sabatier et al. (2020), que estudiaron la circulación del aire en un valle próximo al Mont Blanc donde, por la noche, observaron una estructura de viento en tres capas en que el estancamiento y la recirculación prevalecen en la parte más curvada del valle, que es también la más contaminada. Este resultado les condujo a establecer que la distribución heterogénea de los contaminantes puede estar asociada a la distribución espacial en los patrones de circulación.

En otros estudios se presenta la recirculación del aire solo de manera cualitativa para justificar los altos valores de las concentraciones observadas. Este es el caso de Wu et al. (2010), quienes analizaron el ozono en la estación costera de Linyuan, en el sur de Taiwan y la recirculación del aire fue uno de los elementos asociados a los eventos de polución severa registrados en esta estación. Castañer et al. (2017) estudiaron la influencia de los orígenes de las masas de aire sobre las propiedades ópticas de los aerosoles y las concentraciones de partículas materiales en una estación de alta montaña en el suroeste del Mediterráneo. Para ello, consideraron retro trayectorias de las parcelas del aire de cuatro días y también seis sectores principales. Uno de ellos abarca toda la península Ibérica y corresponde a aquellos escenarios de recirculación regional. Como resultado, obtuvieron que las masas de aire con mayores contribuciones fueron las que estuvieron asociadas al transporte desde el norte de África y también las de recirculaciones regionales, mientras que los valores más bajos correspondieron a advecciones desde el océano Atlántico. En la misma línea, Venter et al. (2020) estudiaron distintas propiedades ópticas a 100 km al suroeste de Johannesburgo, en Sudáfrica. Los altos valores de las variables medidas se atribuyeron, entre otras razones, a la recirculación de las masas de aire contaminadas. Por último, Negral et al. (2021) analizaron las concentraciones de polen en el sureste de la península Ibérica y comentaron que la recirculación del aire podría afectar al contenido de polen inicial de cada masa de aire. Sin embargo, dentro de las variables meteorológicas, puede que la recirculación no sea la variable más contribuyente. Este es el caso presentado por Pérez et al. (2018), que analizaron la influencia de distintas variables meteorológicas sobre las tendencias de  $CO_2$  y  $CH_4$ . Entre las variables, se encontraba el factor de recirculación. Sin embargo, la más influyente fue la temperatura potencial cuando sus valores fueron altos.

Otros análisis tienen en cuenta los valores de dicho factor. Crescenti et al. (1997) analizaron las condiciones meteorológicas en Brownsville, Texas, en dos periodos, uno en primavera, y otro en verano de 1993. Los factores de recirculación fueron bajos, excepto en 4 días discontinuos en primavera, por lo que los autores estimaron que las posibilidades de contaminación fueron bajas en esa situación de tiempo inestable, en la que se estuvo acercando un ciclón extratropical que diluiría las concentraciones por mezcla mecánica y las eliminarían por las precipitaciones asociadas. Castell et al. (2008) estudiaron la relación entre el ozono en Castellón y distintas variables meteorológicas, entre las que se encuentra el factor de recirculación. Ellos observaron la relación entre las altas concentraciones de ozono y los también altos valores del factor de

recirculación. Este resultado respalda la contribución de los ciclos meso-meteorológicos y la recirculación del aire en las concentraciones registradas. Pérez et al. (2014) analizaron la circulación del aire en la isla de Gran Canaria y encontraron que, aunque las condiciones dominantes determinaron una renovación sustancial del aire, hubo una probabilidad estadísticamente significativa de eventos extremos de recirculación que facilitaron las condiciones de acumulación de contaminantes. Assareth et al. (2016) estudiaron el ozono en la estación seca en el este de Tailandia. Entre otros análisis, utilizaron un modelo lineal generalizado que incluyó el factor de recirculación y obtuvieron una respuesta en la que se alcanzaron bajas concentraciones con factores de recirculación próximos a cero, mientras que las más altas concentraciones se asociaron con factores intermedios, alrededor de 0.5. Sin embargo, con factores superiores la concentración descendió ligeramente. Es decir, los valores más altos de los factores de recirculación no estuvieron vinculados a las concentraciones más altas. Li et al. (2018) analizaron observaciones en el delta de río de las Perlas, en China, y usaron el factor de recirculación como un buen indicador de la capacidad de transporte horizontal que incidió, junto con la estratificación de la atmósfera, en la calidad del aire. En concreto, con una acusada inversión del viento y una estratificación térmica estable, la calidad local del aire fue baja. Aunque algunos estudios han calculado los factores de recirculación, solo en alguno de ellos se ha establecido un umbral. Así, Gassman and Gardiol (2007) consideraron el flujo del aire en el área de Mar del Plata, en Argentina, y su influencia en las concentraciones de polen. La recirculación del aire vino propiciada en este caso por la brisa entre el mar y la tierra, y analizaron las situaciones a partir de una frontera de 0.6.

A partir del artículo de Allwine y Whiteman (1994), Li et al. (2020) definieron el factor de recirculación como el cociente entre la distancia de transporte y el recorrido del viento. De forma que, a diferencia de la definición inicial, un bajo valor está asociado a una alta recirculación. Además, utilizaron un método de aglomerados para establecer distintos patrones de circulación, como son, la oscilación, las circulaciones norte o sur, la brisa marina y el estancamiento. Por último, relacionaron la variabilidad diaria del ozono con estos patrones de circulación, ya que las concentraciones más altas del ozono se alcanzaron en situaciones de estancamiento y brisa marina.

Por último, en ocasiones se ha resaltado la utilidad del factor de recirculación a la hora establecer estrategias de control de los contaminantes. Este es el caso de Querol et al. (2017; 2021), que indicaron que las estrategias de control y disminución del ozono pasan por la predicción de episodios de recirculación de manera que, conociendo la respuesta ante los cambios de las concentraciones de los precursores, antes de estos episodios, se apliquen medidas de reducción de  $\text{NO}_x$  y VOC.

La originalidad de esta investigación reside en el lugar geográfico de estudio. Se han hecho mediciones de la recirculación del aire en diferentes zonas del planeta, pero nunca tomando toda la península ibérica como objeto de estudio.

Para el tratamiento de datos se ha hecho uso de la estadística robusta, la cual es menos sensible a valores atípicos. Más concretamente, se ha trabajado con la mediana, el rango intercuartílico, el índice de Yule-Kendall y la curtosis robusta. El empleo de estos estadísticos es la mejor manera de tratar un conjunto de datos tan grande.

Este Trabajo de Fin de Grado se divide en tres grandes secciones: una primera, dedicada a explicar de manera teórica tanto el fenómeno de la recirculación como los parámetros estadísticos empleados en el tratamiento de datos. En el siguiente apartado se exponen los

recursos que se han empleado y se explica con detalle todos los pasos que han sido necesarios para la consecución de nuestros resultados finales. Resultados que encontraremos expuestos en la última parte del trabajo.

## 2. Fundamentos teóricos

### 2.1. Recirculación

La recirculación es un parámetro que da cuenta de la trayectoria que siguen las corrientes de aire. Se basa en sumar todas las trayectorias que sigue el aire en un determinado período de tiempo ( $\sum S_i$ ) y comparar el resultado con la distancia entre el punto final y el inicial ( $L$ ).

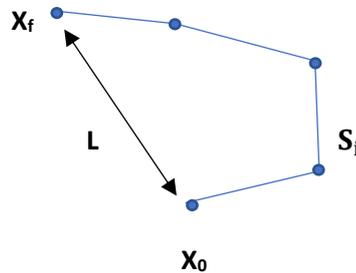


Figura 1: Esquema explicativo de los parámetros de la recirculación

De tal manera que viene dada por la siguiente fórmula:

$$R = 1 - \frac{L}{\sum S_i} \quad (1)$$

Como consecuencia de esta disposición, la recirculación puede tomar valores entre 0 y 1. Un valor nulo significaría que el aire ha seguido una trayectoria recta, puesto que la suma de las trayectorias coincidiría con  $L$ , siendo igual a uno el resultado del cociente y, por tanto, dando cero en el cálculo final. Si, por el contrario, tuviéramos la unidad como valor de la recirculación, significaría que el punto final coincide con el inicial, es decir, que el aire ha seguido una trayectoria que ha finalizado en el mismo punto de partida. Y entre medias de estos valores extremos tendríamos todas las demás posibilidades.

En este trabajo, los datos de partida eran los puntos por los que iba pasando el aire en función del tiempo. Para poder calcular cada pequeña trayectoria, tanto  $L$  como  $S_i$ , se ha empleado la fórmula (2), sacada del libro "Map Projections- A working manual" de Jhon P. Snyder (1987):

$$\text{sen}\left(\frac{c}{2}\right) = \left\{ \text{sen}^2\left[\frac{\alpha - \alpha_1}{2}\right] + \text{cosa}_1 * \text{cosa} * \text{sen}^2\left[\frac{\beta - \beta_0}{2}\right] \right\}^{1/2} \quad (2)$$

Donde  $\alpha$  hace referencia a latitudes y  $\beta$  a longitudes y  $c$  es el parámetro que nosotros buscamos, más concretamente, el arco de nuestra trayectoria. Como en la fórmula que de verdad interesa (la de la recirculación), tan solo vamos a emplear estos datos como cociente de otros con las mismas magnitudes y unidades, no es necesario, en este caso, calcular

explícitamente el valor exacto de la trayectoria, sino que haremos uso de los arcos de las distancias en ambos casos y al hacer el cociente el resultado será el mismo.

## 2.2. Estadísticos robustos

### 2.2.1. Mediana

La mediana hace referencia a la posición central de un conjunto de datos ordenados. Divide en dos partes iguales dicho conjunto. Si hablamos de cuartiles, la mediana corresponde al cuartil  $Q_2$  ó  $q_{0.5}$ . Los cuartiles son tres y dividen un conjunto de datos ordenados en cuatro partes iguales.

La mediana es el indicador de tendencia central más habitual en el tratamiento de datos de la estadística robusta.

### 2.2.2. Rango intercuartílico (IQR)

El rango intercuartílico es una magnitud que da cuenta de la dispersión de los datos con respecto al conjunto central de datos. Es decir, nos indica si los datos están muy juntos entre sí o no. A mayor valor del IQR, mayor dispersión en los datos. Se trata de la diferencia entre el tercer cuartil y el primero:

$$IQR = q_{0.75} - q_{0.25} \quad (3)$$

Empleando esta magnitud, se eliminan los valores extremadamente alejados. Es recomendable el empleo del IQR cuando la medida de tendencia central utilizada ha sido la mediana.

### 2.2.3. Índice de Yule-Kendall

El índice de Yule-Kendall es una medida que nos proporciona información acerca de la simetría que pueda haber en la distribución de datos. Obtendremos valores positivos de esta

magnitud cuando haya datos muy alejados a la derecha de la mediana y, por el contrario, serán negativos cuando los datos muy alejados se encuentren a la izquierda de la mediana.

Viene dada por la siguiente fórmula:

$$\gamma_{YK} = \frac{(q_{0.75} - q_{0.5}) - (q_{0.5} - q_{0.25})}{IQR} = \frac{q_{0.25} - 2q_{0.5} + q_{0.75}}{IQR} \quad (4)$$

Donde vuelven a aparecer el primer cuartil y el tercero ( $q_{0.25}$  y  $q_{0.75}$ ), la mediana o segundo cuartil ( $q_{0.5}$ ) y el rango intercuartílico (IQR).

#### 2.2.4. Curtosis robusta

La curtosis robusta es una medida estadística que determina el grado de concentración que presentan los datos alrededor de la zona central de la distribución. Aporta la información necesaria para saber cómo de aplanada es dicha distribución de datos. Por ejemplo, si los valores centrales están muy repartidos frente al 90% de los datos, será próxima a 0.5. Por el contrario, si los valores centrales están muy concentrados, será próxima a 0.

La expresión para calcularla es la siguiente:

$$K_R = \frac{IQR}{2(q_{0.9} - q_{0.1})} \quad (5)$$

En esta fórmula,  $q_{0.9}$  y  $q_{0.1}$  hacen referencia a los deciles, que son los 9 valores que dividen una serie de datos ordenados en 10 partes iguales.

### 3. Descripción experimental

Para recabar todos los datos con los que se ha trabajado en este estudio se ha utilizado el programa CGER METEX, un algoritmo japonés perteneciente al *National Institute for Environmental Studies*. El aspecto de la interfaz de dicho programa es el siguiente:

## Submission for air trajectory calculation of fixed site

Calculation period (local time):  to

Local time zone:  (hour)

Interval of multiple calculations:  (hour)

Latitude:  (deg) Longitude:  (deg)

Height above surface:  (m)

Trajectory length  (day)

Model:  kinematic  isentropic

Mode:  forward  backward

[View results](#)  
[Submit trajectory calculation for mobile route](#)  
[Submit footprint calculation](#)

Figura 2: Interfaz del programa CGER METEX

Como se aprecia en la imagen, hay que introducir el período de tiempo que nos interesa para el estudio y cada cuánto tiempo queremos las mediciones. En este caso se ha ido recabando mes a mes en intervalos de una hora desde el año 2017 hasta el 2020.

A continuación, hay que introducir en el programa las coordenadas geográficas en las que se encuentra nuestro punto de estudio (latitud y longitud en grados). Para ello se ha dividido a la península ibérica en una red de puntos dada por las intersecciones de cada meridiano con cada paralelo. La red resultante tendría el siguiente aspecto:

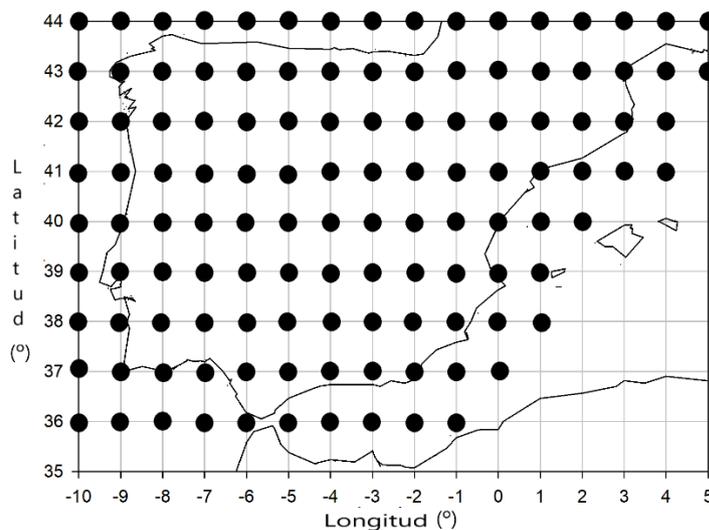


Figura 3: Península Ibérica dividida en la red de puntos sujetos a estudio

El apartado siguiente se refiere a la altura a la que queremos tomar las mediciones con respecto a la superficie. En este estudio se ha tomado a 500 m del suelo.

El seguimiento de la trayectoria es de 5 días por defecto y las otras dos opciones también se han dejado como venían por defecto.

El resultado que se obtiene de este programa es una serie de ficheros Excel, 120 por cada mes, uno por cada punto de la cuadrícula en que hemos dividido la península. El aspecto de cada uno de estos ficheros es el siguiente:

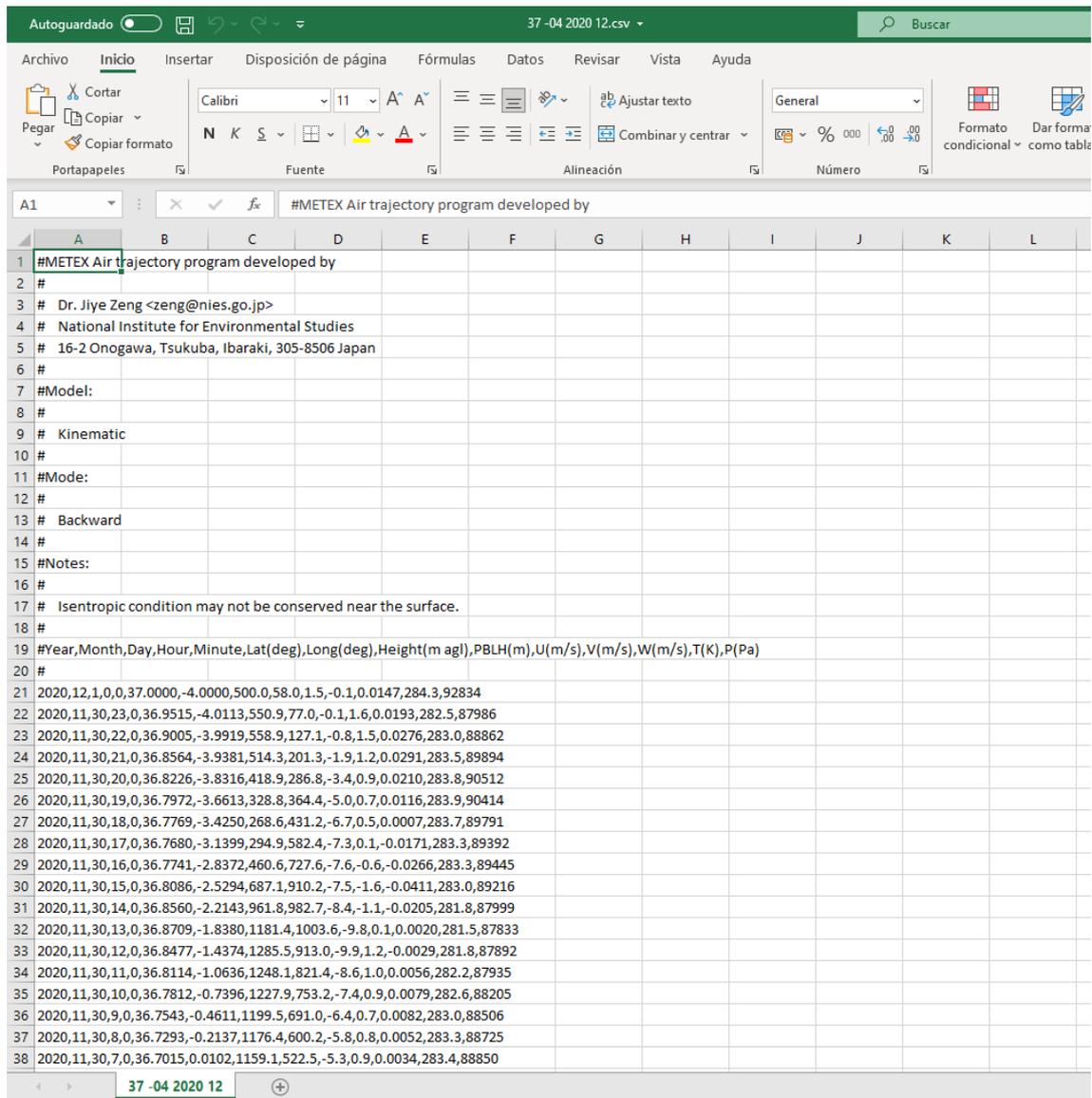


Figura 4: Disposición de los datos primigenios obtenidos

Como vemos, después de unas líneas de información acerca del programa y del método de medición, obtenemos una larga lista de datos estructurados, por líneas, de la siguiente forma: año, mes, día, hora, minuto, latitud, longitud, altura, altura de la capa límite, velocidad (en sus tres componentes), temperatura, presión.

Cada uno de estos ficheros tiene alrededor de 100 000 filas de datos, si recordamos que se recopilaron datos durante 4 años, mes a mes y en cada mes teníamos 120 ficheros como este, es obvio que son muchos datos y había que encontrar la manera de tratarlos.

La solución ha sido hacer un estudio de la recirculación del aire en cada punto para cada 24 h en todos y cada uno de los puntos, de cada año, mes y hora y reorganizar todos esos datos en otro archivo diferente. Los archivos resultantes tienen la siguiente forma:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	LATI	TUD	/LON	GITUD													
2	AÑO	MES	DIA	HORA													
3	2017	1	1		0	0.10829	0.16947	0.22053	0.13975	0.1567	0.34153	0.39025	0.15163	0.15833	0.17987	0.25105	0.42722
4	2017	1	1		1	0.12053	0.18618	0.21795	0.14423	0.15605	0.31679	0.37099	0.09271	0.14602	0.20001	0.22686	0.21451
5	2017	1	1		2	0.16719	0.22247	0.22427	0.17301	0.18199	0.30492	0.34665	0.13892	0.1227	0.21014	0.26008	0.25711
6	2017	1	1		3	0.23967	0.27103	0.30558	0.23805	0.22129	0.29293	0.31929	0.21152	0.14109	0.23516	0.27424	0.38288
7	2017	1	1		4	0.29756	0.31034	0.45397	0.37755	0.25588	0.27539	0.29175	0.19636	0.17506	0.2648	0.28303	0.34719
8	2017	1	1		5	0.32116	0.32832	0.59816	0.49305	0.29627	0.24787	0.26451	0.17553	0.13132	0.25461	0.31441	0.30605
9	2017	1	1		6	0.32211	0.3206	0.73647	0.43999	0.27517	0.22187	0.23291	0.15276	0.09546	0.27652	0.31509	0.2747
10	2017	1	1		7	0.31874	0.30616	0.91245	0.21323	0.20354	0.21692	0.19406	0.1345	0.07407	0.2751	0.31818	0.21537
11	2017	1	1		8	0.34499	0.28948	0.79862	0.07191	0.07619	0.19261	0.15127	0.12393	0.06054	0.27849	0.30914	0.16535
12	2017	1	1		9	0.35034	0.28118	0.49127	0.04651	0.03726	0.17134	0.13384	0.11302	0.05219	0.26978	0.29178	0.13659
13	2017	1	1		10	0.32826	0.28981	0.35877	0.06442	0.04572	0.15192	0.12178	0.10528	0.05007	0.22617	0.27656	0.12452
14	2017	1	1		11	0.31055	0.32149	0.35618	0.33566	0.04752	0.08192	0.10549	0.09449	0.04739	0.19721	0.28155	0.13178
15	2017	1	1		12	0.30802	0.37219	0.43532	0.50995	0.0497	0.05781	0.0814	0.08361	0.04356	0.17628	0.27125	0.15432
16	2017	1	1		13	0.3116	0.43559	0.59209	0.29536	0.05821	0.06167	0.05865	0.10401	0.04319	0.15885	0.25627	0.17167
17	2017	1	1		14	0.33597	0.49583	0.69836	0.32241	0.1306	0.06709	0.04734	0.11718	0.04648	0.14117	0.23469	0.16979
18	2017	1	1		15	0.4502	0.62942	0.66438	0.49132	0.05156	0.04297	0.04472	0.08879	0.02874	0.12972	0.21385	0.18013
19	2017	1	1		16	0.71988	0.73766	0.30714	0.20074	0.06728	0.03144	0.04201	0.08331	0.04186	0.12906	0.19603	0.18701
20	2017	1	1		17	0.79971	0.34001	0.21036	0.10007	0.04359	0.01866	0.0404	0.05761	0.06061	0.13386	0.16693	0.17868
21	2017	1	1		18	0.30381	0.13063	0.1268	0.09192	0.03719	0.01651	0.0421	0.01884	0.05761	0.1276	0.11394	0.16409
22	2017	1	1		19	0.25829	0.10082	0.14034	0.10431	0.0516	0.04036	0.0672	0.0148	0.06104	0.11062	0.08143	0.16767
23	2017	1	1		20	0.31597	0.07041	0.16561	0.10422	0.07851	0.1155	0.13849	0.1534	0.07481	0.08763	0.11969	0.14983
24	2017	1	1		21	0.29844	0.10467	0.0673	0.11391	0.18619	0.30521	0.37847	0.12185	0.04243	0.07255	0.14714	0.08495
25	2017	1	1		22	0.05262	0.13253	0.0264	0.12387	0.33112	0.63802	0.21246	0.12557	0.03871	0.05827	0.10781	0.12571
26	2017	1	1		23	0.03053	0.12992	0.00943	0.11487	0.20274	0.38891	0.15615	0.10783	0.05402	0.08525	0.15223	0.19913
27	2017	1	2		0	0.02585	0.1176	0.04776	0.09086	0.2221	0.31021	0.12496	0.09908	0.03263	0.11002	0.22083	0.39181
28	2017	1	2		1	0.10382	0.06052	0.06638	0.08924	0.06961	0.23245	0.22092	0.17536	0.10994	0.20799	0.31811	0.72902
29	2017	1	2		2	0.12988	0.03479	0.07156	0.10369	0.15156	0.18961	0.15189	0.15766	0.12109	0.41205	0.29251	0.78849
30	2017	1	2		3	0.36103	0.04443	0.05442	0.12431	0.16602	0.14226	0.12311	0.1895	0.15377	0.47831	0.39482	0.65273
31	2017	1	2		4	0.12628	0.05833	0.05443	0.17029	0.12415	0.15923	0.11686	0.12367	0.19973	0.36166	0.35303	0.51111
32	2017	1	2		5	0.04927	0.04786	0.08069	0.23317	0.1321	0.1509	0.11585	0.1379	0.18311	0.31312	0.41961	0.4361
33	2017	1	2		6	0.02272	0.08962	0.15338	0.22988	0.14644	0.13219	0.07348	0.15685	0.14232	0.24139	0.36109	0.42425
34	2017	1	2		7	0.03839	0.10152	0.15326	0.22556	0.10644	0.12705	0.04306	0.11145	0.15122	0.23408	0.30447	0.44196
35	2017	1	2		8	0.103	0.16074	0.22583	0.23516	0.13527	0.13982	0.05973	0.08858	0.22027	0.30135	0.27008	0.44896
36	2017	1	2		9	0.15096	0.18873	0.24989	0.21382	0.12301	0.16965	0.10244	0.12092	0.1895	0.32934	0.2557	0.32336
37	2017	1	2		10	0.08184	0.18681	0.27086	0.19894	0.14063	0.2037	0.09151	0.19656	0.18638	0.33378	0.26485	0.19263
38	2017	1	2		11	0.14945	0.18827	0.2959	0.20466	0.15631	0.21954	0.10999	0.12943	0.19686	0.35061	0.28998	0.1435

Figura 5: Archivo resultante tras la reorganización de datos

Ahora se distingue un valor de la recirculación del aire para cada coordenada, año, mes, día y hora. En las columnas se ven los datos agrupados por coordenadas y cada fila corresponde a una fecha.

Con los ficheros dispuestos de este modo, se han hecho varios estudios. De manera general, podemos diferenciar dos: un primer grupo de estudio referido a la recirculación del aire en la península ibérica mes a mes y un segundo grupo referido al estudio por coordenadas geográficas. Para trabajar con tantos datos, en ambos estudios se ha hecho uso de parámetros pertenecientes a la estadística robusta: la mediana, el rango intercuartílico, el índice de Yule-Kendall y la curtosis robusta han sido calculadas para cada conjunto de datos, tanto por meses como por columnas (coordenadas).

En el primer caso, tras estudiar la recirculación del aire de manera mensual, se han tratado los resultados construyendo diagramas de cajas y bigotes con el programa Statgraphics para cada mes y se han agrupado en cuatro gráficos, uno por cada año para apreciar en cada uno de ellos la evolución anual mes a mes. El resultado son gráficos similares al de la Figura 6:

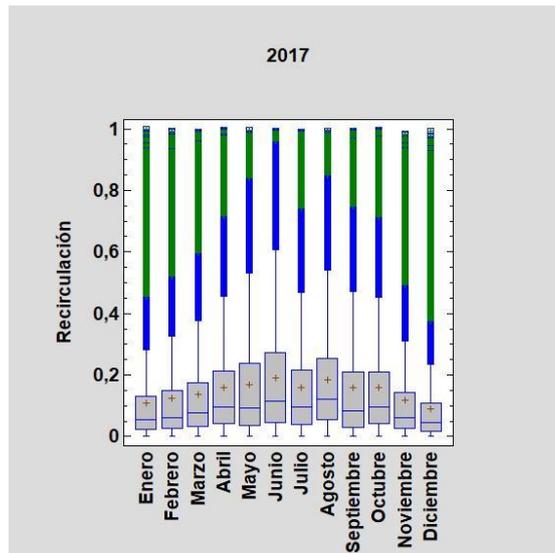


Figura 6: Gráfico de cajas y bigotes anual 2017

En un diagrama de cajas y bigotes, los límites de la caja vienen dados por los cuartiles 1º y 3º. Tenemos también representada la mediana, que corresponde a la línea azul del centro de cada caja. La cruz roja del centro de cada caja representa la media. Y los valores atípicos vienen representados por todos los puntos azules y verdes que hay por encima. Se establecen dos fronteras, la primera corresponde a 1.5 veces el IQR y la segunda a 3 veces el IQR.

En el segundo grupo de estudio, el que trata sobre la recirculación en cada punto geográfico de la península, se ha programado un script en Matlab que nos reconstruye mapas de isolíneas sobre el contorno de la región. Estos mapas nos dan cuenta de las diferentes zonas con índices de recirculación similares. También se han hecho mapas representando los resultados de los rangos intercuartílicos para ver la dispersión de los puntos, de los índices de Yule-Kendall para estudiar la simetría y de la curtosis robusta para discernir la forma de la distribución de valores. Un ejemplo de estos mapas se muestra en la Figura 7:

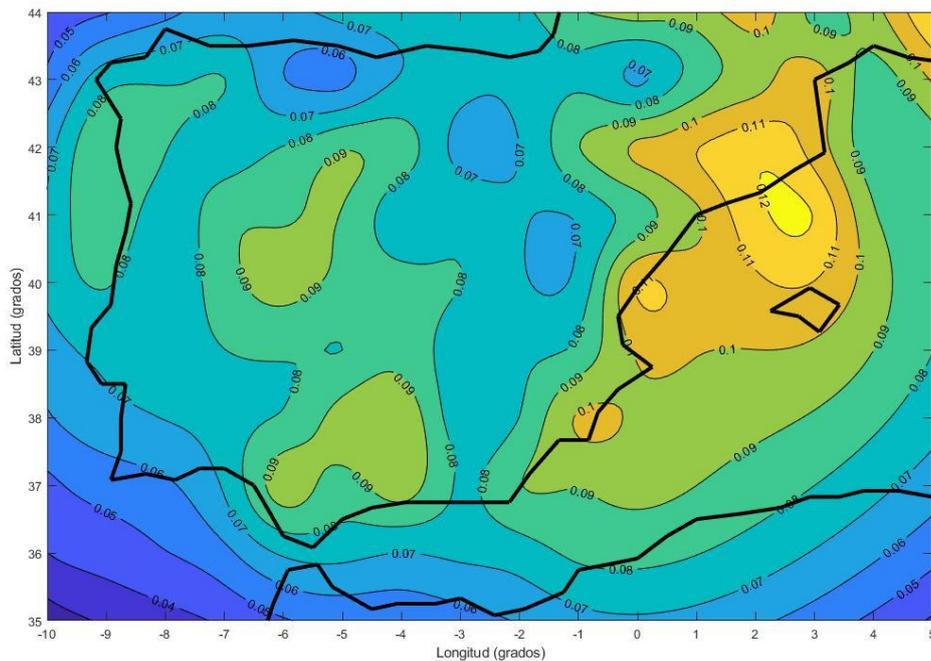


Figura 7: Ejemplo de mapa de isótopos

Donde el dato que indica cada isótopo corresponde con la mediana del valor de la recirculación en esos puntos.

Para la realización de estos gráficos, el script que se ha programado en *Matlab* aparece en el Anexo de este trabajo.

A continuación, se explica su funcionamiento interno: donde se lee 'Recir2017.prn' hace referencia al archivo que previamente hemos preparado para cada año con los datos correspondientes de recirculaciones y coordenadas dispuestos de la manera correcta para que el programa pueda leerlos e interpretarlos sin problema.

De manera resumida, lo que se hace con este algoritmo es definir una serie de puntos en x e y, formar con ellos una red sobre la que estructurar nuestros datos y representar las líneas de contorno con unas isótopos que den cuenta de los valores de las recirculaciones que son iguales entre sí con un intervalo de 0.01 (del valor de la recirculación) entre unas líneas y las del siguiente valor. Además, generamos el contorno de la península ibérica con la herramienta Mapping Toolbox, que genera contornos de las líneas de costa de todo el mundo, en este caso se le concreta en el código que sólo nos muestre las que nos interesan (península). Y, por último, se le añaden pequeños detalles al gráfico como son los títulos en los ejes y las unidades de cada uno.

Con todo esto, tan solo hay que cambiar en cada caso el nombre del archivo por el que corresponda en cada momento para poder ir graficando los diferentes mapas que deseamos.

## 4. Resultados

### 4.1. Evolución anual

Para ver la evolución anual, mes a mes, se han incluido todos los datos en gráficos de cajas y bigotes. Para poder compararlos mejor unos con otros y poder apreciar la evolución a lo largo del año, se han agrupado en un mismo gráfico todos los diagramas de cada año. El resultado obtenido se muestra en la Figura 3:

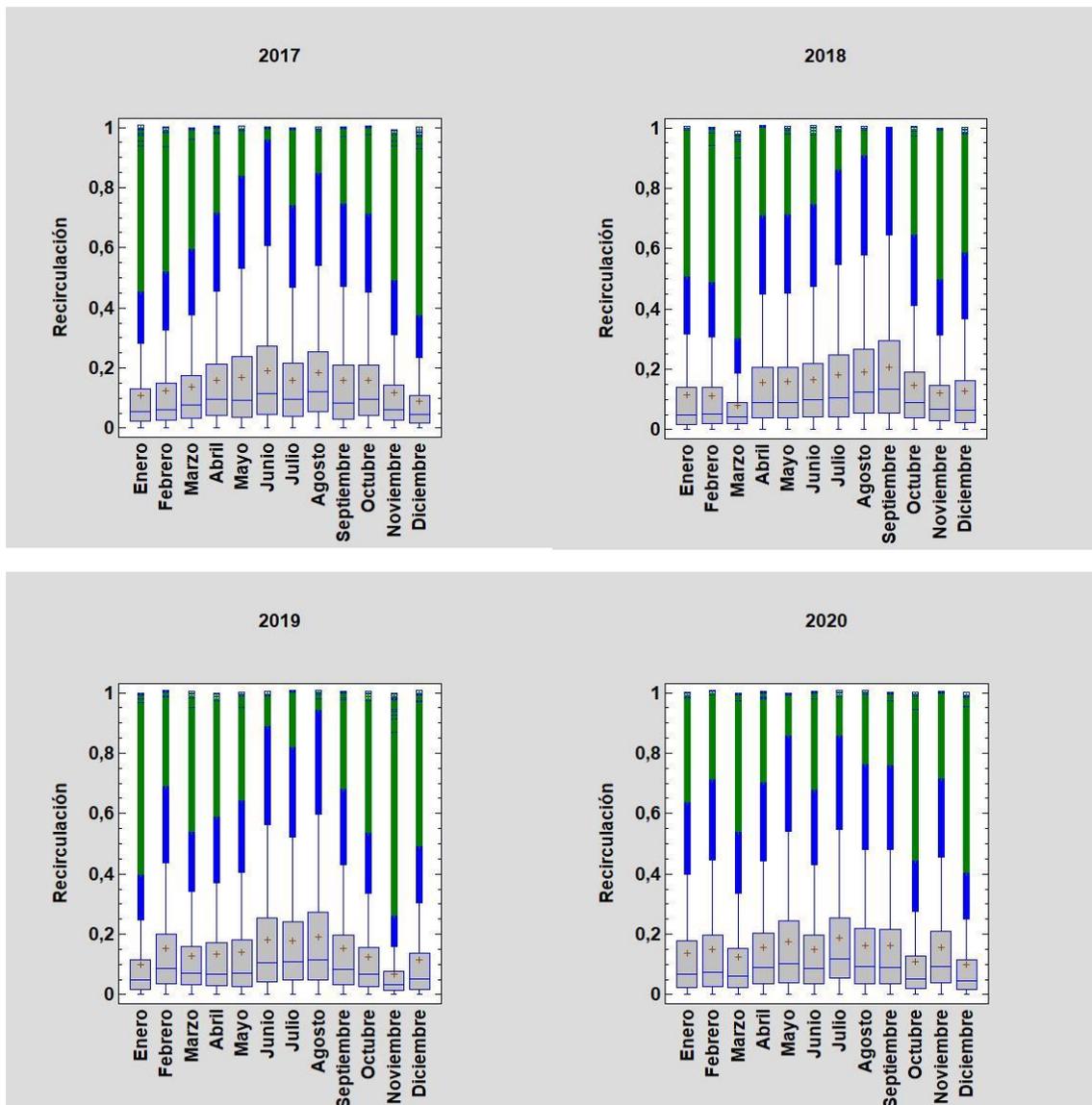


Figura 8: Diagramas de cajas y bigotes 2017-2020

Para empezar, se puede apreciar que, de manera generalizada, la media no coincide con la mediana, sino que está muy por encima. Lo cual le da a la distribución un sesgo positivo, lejos de ser simétrica. Esto se debe a la gran cantidad de valores atípicos que tenemos en la distribución con valores altos.

Los valores medios por lo general son bajos, aunque los más altos se alcanzan durante los meses centrales de año.

También se puede apreciar la presencia de bastantes valores atípicos, que son los que se quedan fuera de las cajas, a una distancia superior a 1.5 veces el rango intercuartílico. Dichas cajas representan el rango intercuartílico.

## 4.2. Distribución espacial

Para ver con claridad la distribución geográfica de las diferencias de recirculación entre unos puntos y otros de la península se han trazado mapas de isolíneas con diferentes colores. Se han estudiado cuatro tipos de mapas diferentes atendiendo a los cuatro estadísticos estudiados: mediana, rango intercuartílico, índice de Yule-Kendall y curtosis robusta.

- Medianas:

De manera generalizada, se puede decir que las recirculaciones están lejos de ser altas en la península ibérica. Siendo entre 0 y 1 los valores posibles de la recirculación, observamos en la Figura 9 que son todo valores bajos, ninguno por encima de 0.2.

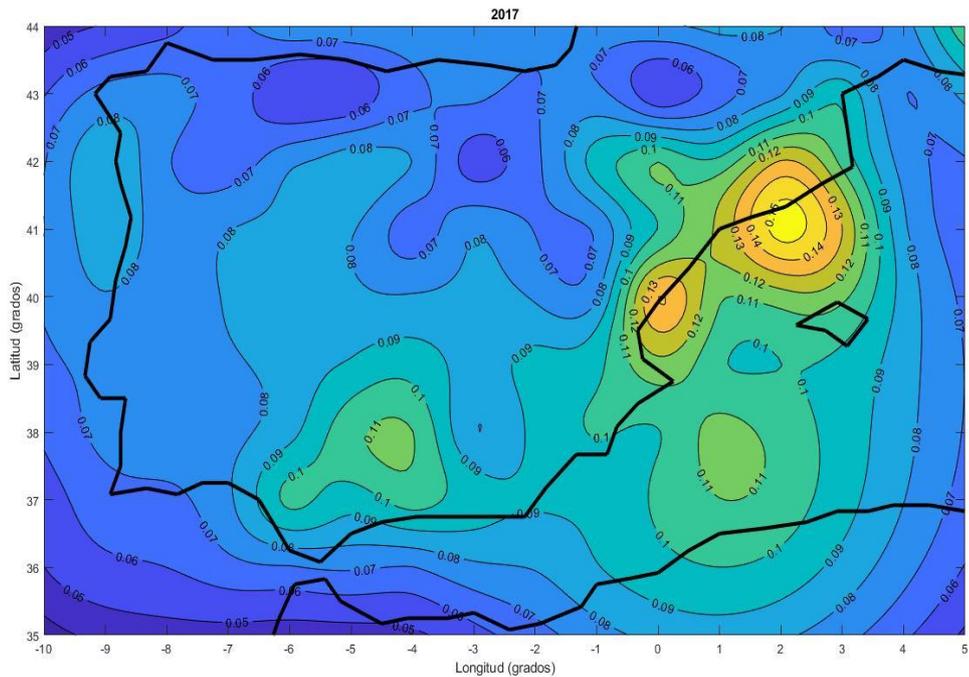


Figura 9: Gráfico de isolíneas de las recirculaciones de 2017

En el año 2017 se aprecian dos puntos con recirculaciones un poco más marcadas. Los observamos en la zona este de la península principalmente, con unos valores que oscilan entre 0.11 y 0.15, y una recirculación en el sur un poco mayor a las de alrededor (0.11). En el resto del territorio se observan recirculaciones relativamente bajas y más o menos similares entre ellas, rondando cifras entre 0.06 y 0.08.

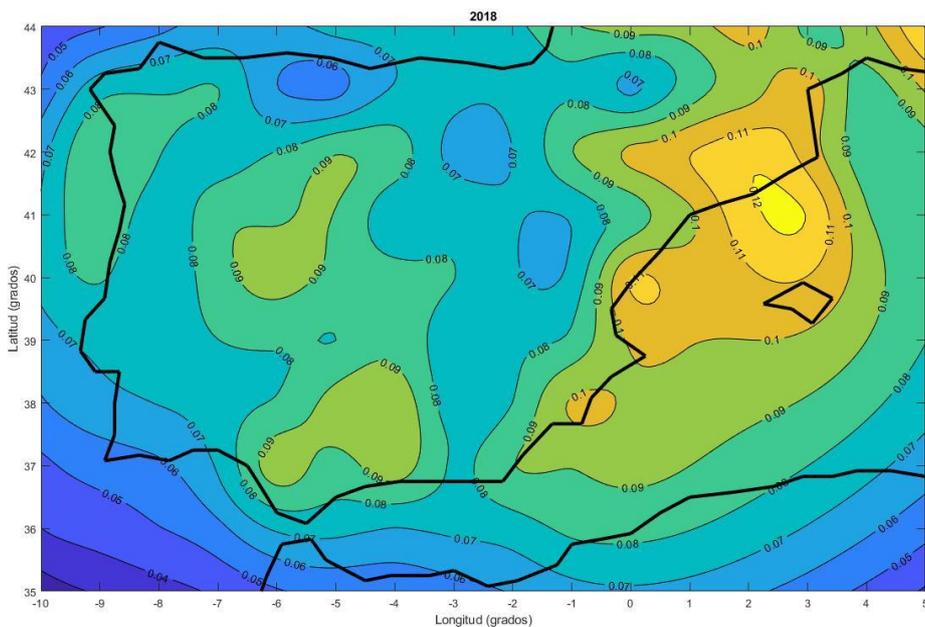


Figura 10: Gráfico de isolíneas de las recirculaciones de 2018

En el año 2018 (Figura 10) se distinguen las mismas zonas de mayor recirculación que en el 2017. Aunque parece que esta vez hay un punto en la zona de la meseta superior que también debiéramos considerarlo como zona de recirculación más alta que el resto, los valores reales apenas distan 0.01 de las recirculaciones del año anterior en esos mismos puntos, pero al haber descendido unas centésimas en los puntos de mayor recirculación (este peninsular), da la sensación visual de que el cambio es mayor en ese punto.

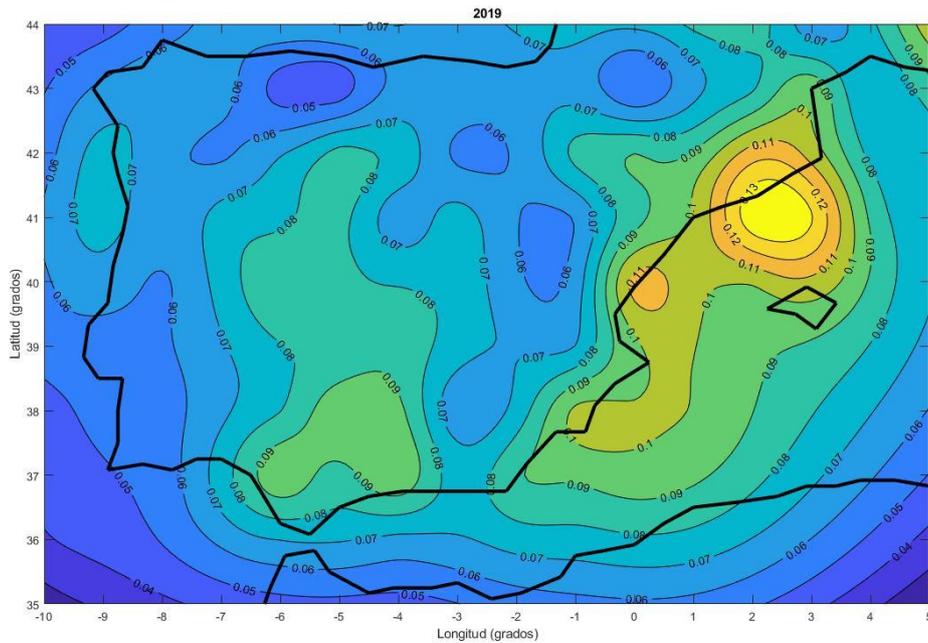


Figura 11: Gráfico de isolíneas de las recirculaciones de 2019

En el año 2019 (Figura 11) el resultado es prácticamente idéntico al año anterior, con las mismas zonas de mayor y menor recirculación del aire y con valores prácticamente iguales. Sin embargo, sí podemos apreciar que en el norte peninsular hay una pequeña zona con cierta tendencia a descender su valor de la recirculación (0.05), tendencia que veremos confirmada en el siguiente mapa (Figura 12).

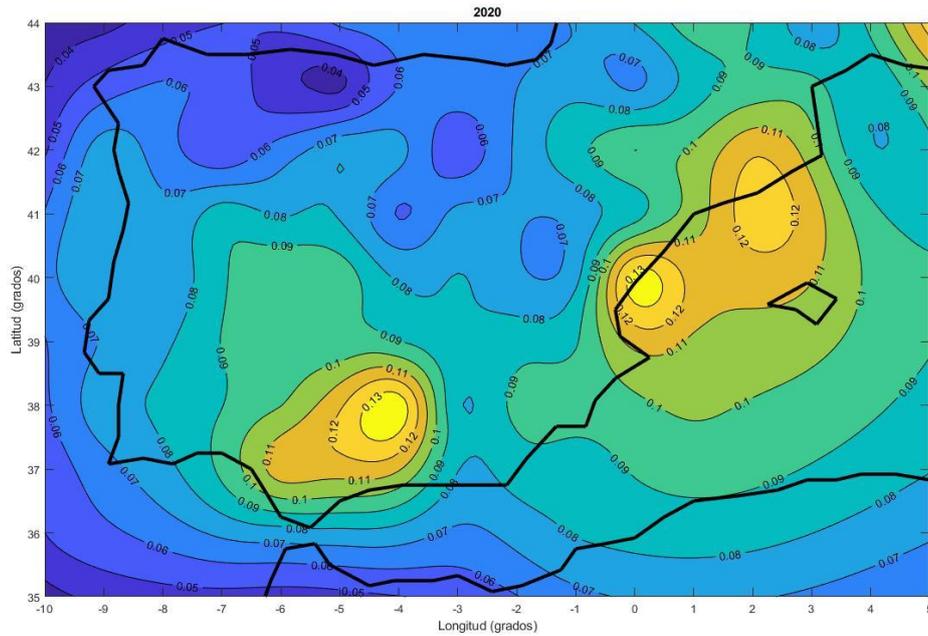


Figura 12: Gráfico de isolíneas de las recirculaciones de 2020

En el año 2020 podemos apreciar que esa zona del norte ha terminado siendo el punto de menor recirculación de todo el territorio alcanzando la cifra de 0.04. En la zona sur se han alcanzado unos valores máximos en ese punto que antes no llegaba a ser tan alto como el del este peninsular. En este caso se ve que en el sur se han reportado unos valores tan altos como en la costa catalana llegando a alcanzar la misma cota máxima de 0.13 en ambas zonas.

- Rango Intercuartílico (IQR):

El rango intercuartílico es una medida de dispersión de los datos. Lo calculamos como la diferencia entre Q3 y Q1. Es decir, que allí donde haya un valor alto del IQR, será porque hay grandes diferencias entre los valores de la recirculación en esos puntos. Por otro lado, en los lugares en los que el IQR sea menor, los valores de la recirculación serán más próximos a la mediana.

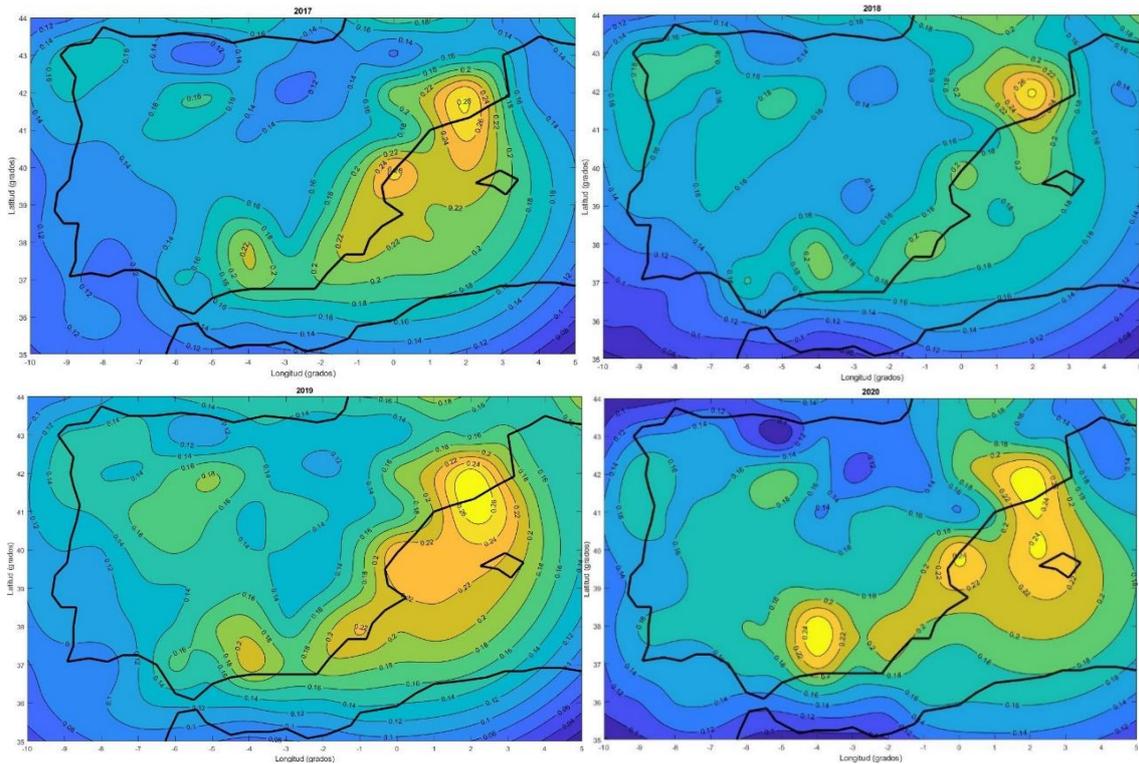


Figura 13: Gráficos de isolíneas del IQR de 2017 a 2020

Como vemos en el mapa del año 2017 (Figura 13), las zonas con mayores valores corresponden a la costa este de la península llegando a valores que oscilan entre 0.2 y 0.28. Las cuales, por otro lado, también eran los puntos de mayor recirculación. Es decir, los puntos de mayor recirculación de la península también son los puntos que más dispersión tienen en sus valores.

Por otra parte, las zonas con menor IQR corresponden con el norte y el oeste peninsular, con valores comprendidos entre 0.12 y 0.18, lo que significa que son zonas con valores de la recirculación más estables y cercanos a la mediana.

Si se analizan los 4 mapas de los 4 años que aparecen en la Figura 13, en conjunto, vemos que la dinámica antes analizada se repite de manera general con leves variaciones de unos años con respecto a otros. Hay apenas una diferencia máxima de 0.04 en los puntos de mayor variación.

- Índice de Yule-Kendall:

El índice de Yule-Kendall es un indicador de simetría; nos informa de si los datos tienen valores más dispersos a la izquierda o a la derecha de la mediana. Cuando dicho índice es alto, significa que la mediana está cercana al primer cuartil. Si por el contrario, el índice es bajo, la mediana estará más cerca del tercer cuartil.

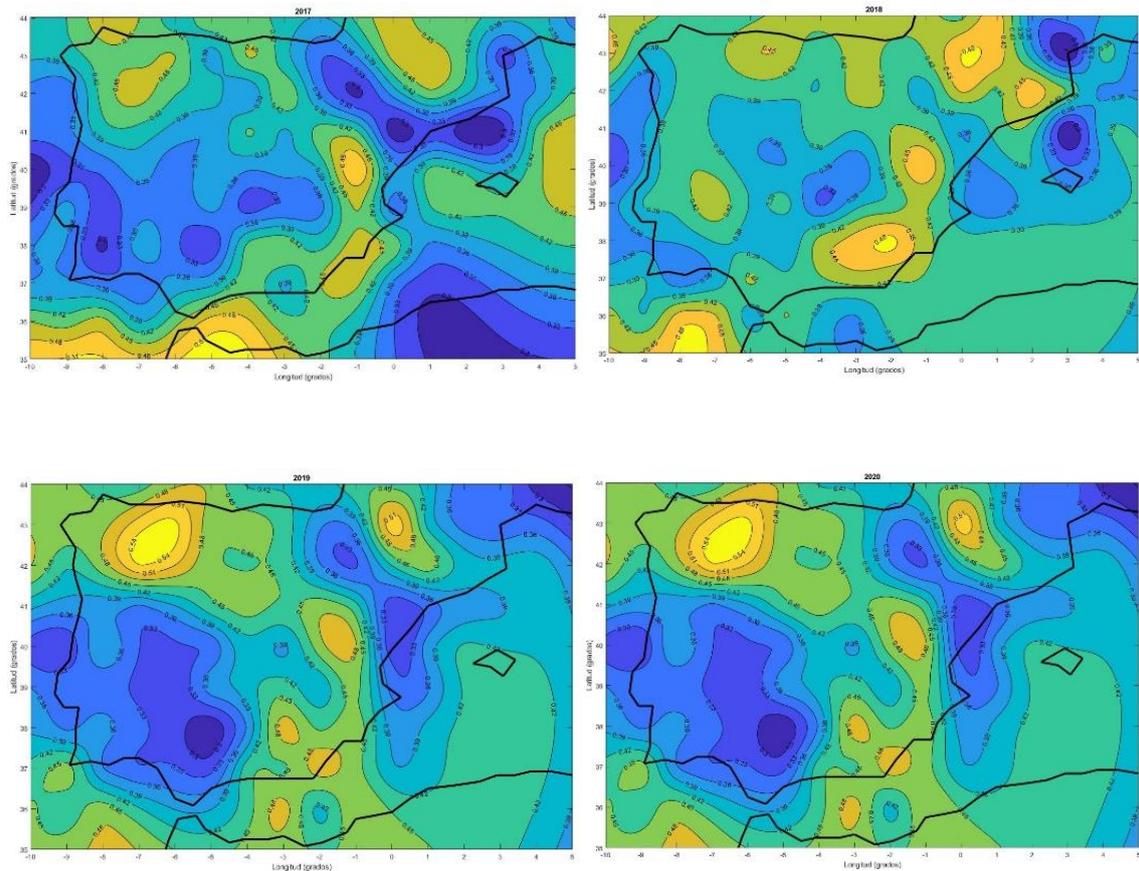


Figura 14: Mapas de isolíneas del índice de Yule-Kendall de 2017 a 2020

Como vemos en la Figura 14, en estos mapas se aprecian tres zonas de altos índices, que oscilan entre valores de 0.45 y 0.54: la zona noroeste de la península, la zona noreste y la costa mediterránea. Esto significa que en dichas zonas se han registrado valores de la recirculación mucho más altos que en el resto.

A la vista de estos datos, se puede hacer una comparación con el mapa geográfico de la península y claramente se advierte una cierta relación entre estos valores y los sistemas montañosos ubicados en esas regiones: la zona noroeste corresponde con la Cordillera Cantábrica, la zona noreste se ubica claramente en los Pirineos y la zona de la costa mediterránea puede verse influenciada por la Cordillera Subbética en la parte situada más al sur y por el Sistema Ibérico en la región que está un poco más al norte de la anterior.

En el resto de la península, zonas central, oeste y suroeste de la misma, se recogen los valores más bajos, con índices de 0.3 como cota mínima; pudiendo oscilar en algunos puntos hasta alcanzar 0.4 en algunas regiones.

También es llamativo el territorio que se corresponde con el cauce del río Ebro. Apreciamos en esos puntos bajos valores del Índice de Yule-Kendall, llegando a alcanzar el mínimo de 0.3, aun estando situado justo entre dos de las zonas con más altos índices antes expuestas (la de los Pirineos y la de la costa mediterránea).

- Curtosis robusta:

Este parámetro da cuenta del aplanamiento de la distribución. El valor de la curtosis robusta para una distribución normal es de 0.262.

En la Figura 15 se han juntado los gráficos de la curtosis de los 4 años. Aunque a primera vista, por la distribución de colores puedan parecer un poco dispares (sobre todo el mapa de 2018), si atendemos a los valores numéricos vemos que apenas hay diferencias de unos años a otros, hay bastante regularidad.

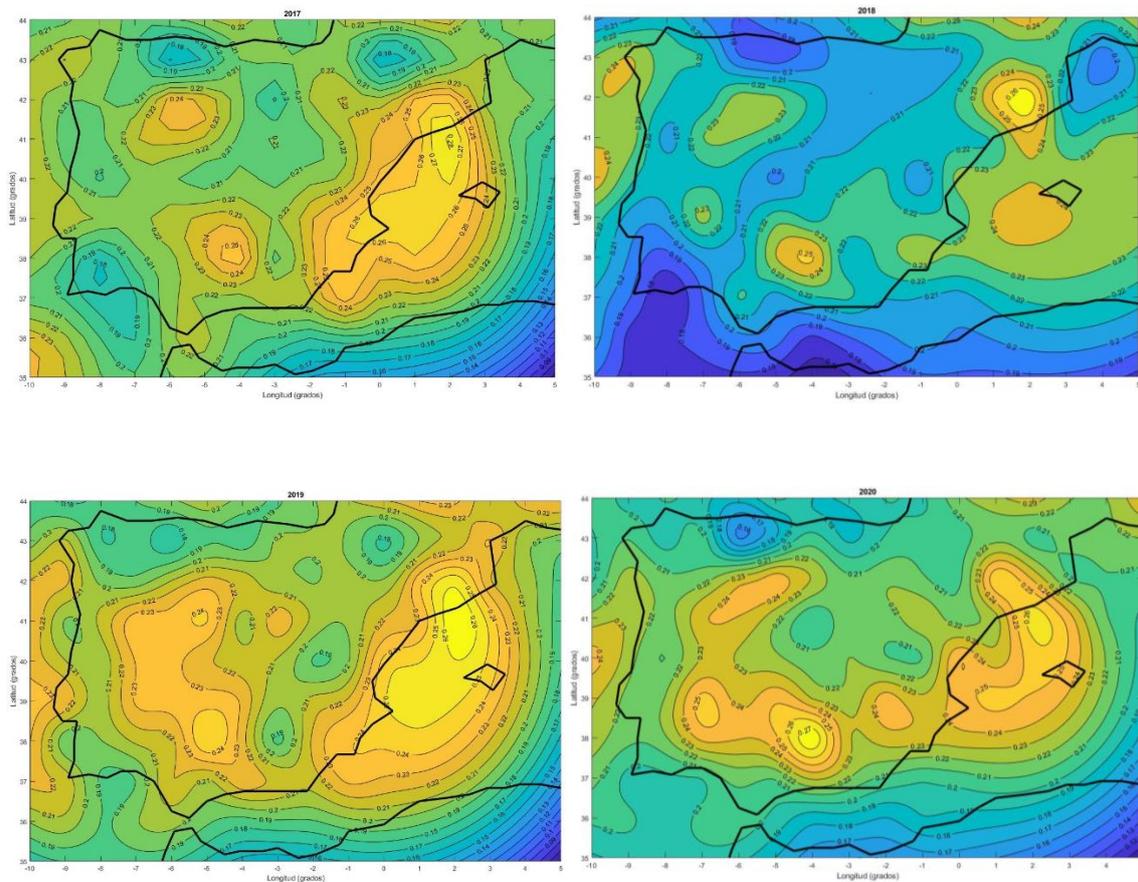


Figura 15: Mapas de isóneas de la curtosis robusta de 2017 a 2020

Por lo general, los valores están muy próximos al valor de 0.26, con una ligera tendencia hacia valores inferiores. Esto significa que la distribución tiende a ser un poco más aguda que la normal. Encontramos este rango por toda la península, principalmente en toda la zona central y en el oeste. Aunque también encontramos algún valor de 0.27 ó 0.28 en la costa de Cataluña (corresponde con los valores más altos alcanzados).

En la zona norte y suroeste se localizan los puntos de menor valor, llegando a alcanzar 0.18 como cota mínima generalizada todos los años, salvo en el 2020, que se aprecia una pequeñita región en el norte cuya isónea corresponde a 0.16.

Desde luego en ningún punto de nuestro estudio se acerca demasiado ni a 0 ni a 0.5, rondan valores medios por todo el territorio, por lo que podemos concluir que nuestra distribución de valores se acerca mucho a una gaussiana o distribución normal.

Como se ha visto durante toda esta sección, la península ibérica es un territorio con unos valores de recirculación del aire bastante bajos en general (entre 0.04 y 0.15). En líneas generales, las mayores recirculaciones se producen en los meses centrales del año, entre abril y septiembre. Estos valores son muy equiparables a los obtenidos en un estudio hecho en Narora, India (Kumar et al., 2013). El estudio entero sigue una línea muy similar a este y obtiene unos resultados medios para la recirculación que oscilan entre 0.07 y 0.15, así como valores dispersos que llegan a rozar los valores límites de 0 y 1. En el ya mencionado antes (Nankar et al., 2009), se obtuvieron un rango de valores medios entre 0.12 y 0.19, también bastante cercanos. Un poco mayores pero también muy cercanos fueron los valores encontrados en Venegas et al. (1999), con unos valores medios mínimos de 0.16 y máximos de 0.25.

En cuanto a la relación entre las medidas y la época del año encontramos similitudes en Levy et al. (2008), en un estudio localizado en el Mediterráneo oriental, donde se llega a la conclusión de que en invierno es donde se encuentran los valores más bajos de la recirculación, así como en otoño se daban los mayores debido a la mayor diferencia de temperatura entre la tierra y el mar, casuística que intensifica la brisa terrestre. Conclusiones parecidas se obtienen en Venegas et al. (1999), siendo los meses de verano aquellos en los que se encuentra una mayor recirculación.

## 5. Conclusiones

La costa este de la península es el lugar más significativo que se encuentra en este estudio. En ella se registran los valores más altos de la recirculación de todo el territorio (0.15). Esta misma zona es la que registra también los valores más altos del rango intercuartílico (0.28), es decir, son las regiones que mayor dispersión presentan en su conjunto de datos.

Si atendemos a la información que nos aporta el índice de Yule-Kendall, en esta zona vemos que no podemos encontrar demasiada relación entre este estadístico y los altos valores de la recirculación, ya que, como hemos visto anteriormente, parece que la orografía montañosa tiene mayor influencia en los datos arrojados. Si nos fijamos en toda la costa mediterránea, encontramos puntos altos y zonas con valores más bajos indistintamente por las mismas regiones por las que encontrábamos toda la zona de altas recirculaciones. Dichos valores oscilan entre 0.3 y 0.48.

Además, en esta parte de la península se registran los valores máximos de la curtosis robusta, aunque como se ha visto anteriormente, no hay una diferencia significativa con otros puntos del territorio.

Como compendio general, hay algo que sí parece lícito relacionar: los sistemas montañosos y la cercanía al mar (como hemos explicado anteriormente) afectan de manera significativa a que haya una mayor o menor recirculación, hecho que está completamente de acuerdo con uno de los trabajos más relevantes sobre este tema.

En futuros estudios, podría continuarse esta línea de investigación relacionando el factor de recirculación con distintas variables meteorológicas o con las situaciones sinópticas que afectan a la Península Ibérica, lo que, sin duda, ayudaría en la descripción de las situaciones vinculadas a episodios de contaminación.

## 6. Bibliografía

Allwine, K. Jerry; Whiteman, C. David, 1994. Single-station integral measures of atmospheric stagnation, recirculation and ventilation. *Atmospheric Environment*, Vol. 28, Nº 4, pp.713-721.

Assareh, Nosha; Prabamroong, Thayukorn; Manomaiphiboon, Kasemsan; Theramongkol, Phunsak; Leungsakul, Sirakarn; Mitrjit, Nawarat; Rachiwong, Jintarat, 2016. Analysis of observed Surface ozone in the dry season over Eastern thailand during 1997-2012. *Atmospheric Research* 178-179, 17-30.

Carro-Calvo, Leopoldo; Ordóñez, Carlos; García-Herrera, Ricardo; Schell, Jordan L., 2017. Spatial clustering and meteorological drivers of summer ozone in Europe. *Atmospheric Environment* 167, 496-510.

Castañer, R.; Nicolás, J.F.; Crespo, J.; Yubero, E.; Galindo, N.; Caballero, S.; Pastor, C., 2017. Influence of air mass origins on optical properties and PM concentrations measured at a high mountain station located in the southwestern Mediterranean. *Atmospheric Research* 197, 244-254.

Castell, Nuria; Mantilla, Enrique; Millan, Millan M., 2008. Analysis of tropospheric ozone concentration on a western Mediterranean site: Castellon (Spain). *Environ Monit Assess* 136:3-11.

Conradie, E.H., Van Zyl, P.G., Pienaar, J.J., Beaukes, J.P., Galy-Lacaux, C., Venter, A.D., Mkhathshwa, G.V., 2016. The chemical composition and fluxes of atmospheric wet deposition at four sites in South Africa. *Atmospheric Environment* 146, 113-131.

Crescenti, Genaro H., 1997. Meteorological Measurements during the lower Rio Grande Valley environmental study. *Environmental International*, Vol. 23, Nº 5, pp. 629-642.

Crumevolle, Suzanne; Augustin, Patrick; Rivellini, Laura-Hélène; Choël, Marie; Riffault, Véronique; Deboudt, Karine; Fourmentin, Marc; Dieudonné, Elsa; Delbarre, Hervé; Derimian, Yevgeny; Chiapello, Isabelle, 2019. Aerosol variability induced by atmospheric dynamics in a coastal area of Senegal, North-Western Africa. *Atmospheric Environment* 203, 228-241.

Galina Surkova, 2013. Air recirculation and ventilation in the coastal regions of the Black Sea. *Central European Journal of Geosciences*.

Gassmann, María Isabel; Gardiol, Jesús María, 2007. Weather conditions associated with the potential for pollen recirculation in a coastal area. *Meteorological Applications* 14: 39-48. [www.interscience.wiley.com](http://www.interscience.wiley.com)

In't Veld, M., Carnerero, C., Massagué, J., Alastuey, A., de la Rosa, J.D., Sánchez de la Campa; A.M., Escudero; M., Mantilla; E., Gangoiti; G., Pérez García-Pando; C., Olid; M., Moreta; J.R., Hernández; J.L., Santamaría; J., Millán; M., Querol, 2021. Understanding the local and remote source contributions to ambient O<sub>3</sub> during a pollution episode using a combination of experimental approaches in the Guadalquivir valley, southern Spain. *Science of the Total Environment* 777, 144579.

Kumar, Deepak; Kumar, Avinash; Kumar, Vimal, Kumar, Jaivender; Ravi, P.M., 2013. Study of atmospheric stagnation, recirculation and ventilation potential at Narora Atomic Power Station NPP site, *Environ Monit Assess* 185:2887-2894.

Levy, Ilan; Mahrer, Yizhak; Dayan, Uri, 2008. A five-year study of coastal recirculation and its effect on air pollutants over the East Mediterranean region. *Journal of geophysical research*, vol. 113.

Levy, Ilan; Mahrer, Yizhak; Dayan, Uri, 2009. Coastal and synoptic recirculation affecting air pollutants dispersión: A numerical study. *Atmospheric Environment* 43, 1991-1999.

Li, Haowen; Wang, Baomin; Fang, Xingqin; Zhu, Wei; Fan, Qi; Liao, Zhiheng; Liu, Jian; Zhang, Así; Fan, Shaojia, 2018. Combined effect of boundary layer recirculation factor and stable energy on local air quality in the Pearl River Delta over southern China. *Journal of the Air & Waste Management Association*.

Li, Wei; Wang, Yuxuan; Bernier, Claudia; Estes, Mark, 2020. Identification of sea breeze recirculation and its effects on ozone in Houston, Tx, during DISCOVER-AQ 2013. *Advancing earth and space science*.

Massagué, Jordi; Contreras, Juan; Campos, Alberto; Alastuey, Andrés; Querol, Xavier, 2021. 2005-2018 trends in ozone peak concentrations and spatial contributions in the Guadalquivir Valley, southern Spain. *Atmospheric Environment* 254, 118385.

Nankar, D.P.; Patra, A.K.; Dole, M.U.; Venkataraman, S.; Hegde, A.G., 2009. Atmospheric stagnation, recirculation and ventilation characteristics at Kakrapar atomic power station site. *Annals of Nuclear Energy* 36, 475-480.

Negral, L., Moreno-Grau, S., Galera, M.D., Elvira-Rendueles, B., Costa-Gómez, I., Aznar, F., Pérez-Badia, R., Moreno, J.M., 2021. The effects of continentally, marine nature and the recirculation of air masses on pollen concentration: Olea in a Mediterranean coastal enclave. *Science of the Total Environment* 790, 147999.

Pérez, Isidro A., Sánchez, M. Luisa; García, M. Ángeles; Paredes, Vanessa, 2011. Relationship between CO<sub>2</sub> at a rural site and integral measures of atmospheric stagnation, recirculation and ventilation. *Naturwissenschaften* 98:565-574.

Pérez, Isidro A., Sánchez, M. Luisa; García, M. Ángeles; Pardo, Nuria; Fernández-Duque, Beatriz, 2018. The influence of meteorological variables on CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> trends recorded at a semi-natural station. *Journal of Environmental Management* 209 37-45.

Pérez, N., Rodríguez, G., Pacheco, J.M., 2014. Atmospheric recirculation on the east coast of Gran Canaria Island. *WIT Transactions on Ecology and The Environment*, Vol 183.

P.D. Tyson, M. Garstang, R. Swap, 1996. Large-Scale Recirculation of Air over Southern Africa. *Journal of applied meteorology*, volumen 35.

Querol, X., Alastuey, A., Orío, A., Reina, F., Dieguez, J.J., Mantilla, E., Escudero, M., Alonso, L., Millán, M., 2016. On the origin of the highest ozone episodes in Spain. *Science of the Total Environment* 572, 379-389.

Querol, X., Gangoiti, G., Mantilla, E., Alastuey, A., Amato, F., Reche, C., Viana, M., Moreno, T., Rivas, I., Pérez, N., Olid, M., Udina, M., Alonso, L., Millán, M., Ahn, K., 2017. Phenomenology of high-ozone episodes in NE Spain. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 2817-2838.

Querol, X., Escudero, M., Gangoiti, G., Mantilla, E., Alastuey, A., Amato, F., Reche, C., Viana, M., Moreno, T., Rivas, I., Pérez, N., Olid, M., Udina, M., Notario, A., Alonso, L., Millán, M., Ahn, K., 2018. Phenomenology of summer ozone episodes over the Madrid Metropolitan Area, central Spain. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18, 6511-6533.

Sabatier, T., Paci, A., Lac, C., Canut, G., Largeron, Y., Masson, V., 2019. Semi-idealized simulations of wintertime flows and pollutant transport in an Alpine valley: Origins of local circulations (Part I). *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*.

Snyder, John P., 1987. *Map Projections- A working manual*.

Venegas, L.E., Mazzeo, N.A., 1999. Atmospheric stagnation, recirculation and ventilation potential of several sites in Argentina. *Atmospheric Research* 52, 43-57.

Venter, M., Beukes, J.P., Vakkari, V., Josipovic, M., Kulmala, M., Laakso, L., 2020. Six-year observations of aerosol optical properties at a southern African grassland Savannah site. *Atmospheric Environment* 230, 117477.

Wang, H., Lyu, X., Guo, H., Wang, Y., Zou, S., Ling, Z., Wang, X., Jiang, F., Zeren, Y., Pan, W., Huang, X., Shen, J., 2018. Ozone pollution around a coastal region of South China Sea: interaction between marine and continental air. *Atmospheric Chemistry and Physics* 18, 4277-4295, 2018.

Wu, Yee-Lin; Lin, Ching-Ho; Lai, Chin-Hsing; Lai, Hsin-Chih; Young, Chea-Yuan, 2010. Effects of local circulations, turbulent internal boundary layers and elevated industrial plumes on coastal ozone pollution in the downwind Kaohsiung urban-industrial complex. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, Vol. 21, Nº2, 343-357.

Wilks, Daniel S., 2020. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, Fourth Edition.

## 7. Anexo

A continuación, detallamos el script con el que se han hecho los mapas de isolíneas en el programa *Matlab*:

```
data=load('Recir2017.prn');  
x=-10:0.1:5;y=35:0.1:44;  
[XI,YI]=meshgrid(x,y);  
ZI=griddata(data(:,1),data(:,2),data(:,3),XI,YI,'v4');  
min(data(:,3))
```

```

max(data(:,3))
v=0:0.01:1;
f = figure;

[c,h]=contourf(XI,YI,ZI,v);
clabel(c,h)
hold on
C=load('coastlines');
plot(C.coastlon,C.coastlat,'k','linewidth',3)
xlim([-10 5])
xticks(-10:1:5)
ylim([35 44])
xlabel('Longitud (grados)')
ylabel('Latitud (grados)')
f.Units='centimeters';
f.Position=[0,0,15,9];

hold off

```

## Índice de figuras

1. Esquema explicativo de los parámetros de la recirculación.....	7
2. Interfaz del programa CGER METEX.....	10
3. Península Ibérica dividida en la red de puntos sujetos a estudio.....	11
4. Disposición de los datos primigenios obtenidos.....	11
5. Archivo resultante tras la reorganización de datos.....	12
6. Gráfico de cajas y bigotes anual 2017.....	13
7. Ejemplo de mapa de isolíneas.....	14
8. Diagramas de cajas y bigotes 2017-2020.....	15
9. Gráfico de isolíneas de las recirculaciones de 2017.....	17
10. Gráfico de isolíneas de las recirculaciones de 2018.....	17
11. Gráfico de isolíneas de las recirculaciones de 2019.....	18
12. Gráfico de isolíneas de las recirculaciones de 2020.....	19
13. Gráficos de isolíneas del IQR de 2017 a 2020.....	20
14. Mapas de isolíneas del índice de Yule-Kendall de 2017 a 2020.....	21
15. Mapas de isolíneas de la curtosis robusta de 2017 a 2020.....	22