

# REGIONALIZACIÓN DE LA PENÍNSULA IBÉRICA E ISLAS BALEARES DESDE EL PUNTO DE VISTA EÓLICO: APLICACIÓN AL ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DEL RECURSO EÓLICO EN UN ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO

Guillermo GÓMEZ PRADA<sup>1</sup>, William CABOS NARVAEZ<sup>1</sup>, Giovanni LIGUORI<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>*Depto. De Físicas. Universidad de Alcalá de Henares – Madrid*  
[ggomez@isdefe.es](mailto:ggomez@isdefe.es)

## 1. RESUMEN

El impacto de la actividad humana en la evolución del clima ha sido fundamentado por numerosísimos estudios realizados por distintas disciplinas científicas, cuyos resultados han sido resumidos en las conclusiones de los informes de evaluación del IPCC. Y aunque la mayoría de los esfuerzos de la comunidad científica se han centrado en el estudio del impacto de los distintos escenarios de cambio climático en los campos de precipitación y temperatura, existe número creciente de publicaciones que estudian el efecto del cambio climático sobre el potencial eólico. En este trabajo estudiamos la evolución del potencial eólico en la Península Ibérica e Islas Baleares, hasta el 2050, simulado por el conjunto de cuatro RCMs utilizados en el marco del proyecto nacional ESCENA. Como un paso previo al estudio de la evolución de los vientos en la Península Ibérica e Islas Baleares, se dividió la Península en regiones con un comportamiento similar desde el punto de vista eólico, con el objeto de estudiar la evolución de los vientos de cada una de estas zonas como un todo. En este trabajo se estudia la evolución del recurso eólico en un ensemble de cuatro RCMs del proyecto ESCENA. Todos los modelos muestran una disminución del recurso hacia el año 2050, aunque la rapidez del cambio varía según las distintas regiones.

Palabras Clave: K-means, evolución potencial eólico, RCMs, Península Ibérica

## ABSTRACT

The effects of the human activity in the climate change are supported by numerous studies of different scientific disciplines, and their results have been summed up in the IPCC documents. Although most of studies of the scientific community have been focused in the evolution of the temperature and precipitation fields, there are an increasingly number of studies about the evolution of wind power. These kinds of studies not only have interest from scientific point of view, they are interesting from energetic point of view too. A better knowledge of the wind speed variability we allow us to optimize better this resource. In addition, the wind power has become one of the main energy sources for some world areas as the Iberian Peninsula during the last decades. For example, in 2013 the wind power satisfied the 21,1% of the electricity demand of Spain, this fact made that the wind power was the main source of the electricity. As a previous study to the wind evolution of the Iberian Peninsula and Balears Islands, the Iberian Peninsula was divided into regions to study the wind evolution of each region, to this end four RCMs of ESCENA project were used. All models show a reduction of wind power in 2050, but this reduction would be more dramatic for some areas than others.

Key words: K-means, wind power evolution, RCMs, Iberian Peninsula

## 2. INTRODUCCIÓN

Actualmente existe una gran preocupación por el agotamiento de las fuentes de energía no renovables, y el efecto que el uso de éstas tiene en el clima. Una solución a ambos problemas, o por lo menos un paliativo, serían las energías renovables, entre las que se incluiría la eólica. En el informe macroeconómico 2010 de la Asociación Empresarial Eólica, se presenta a las energías renovables en su conjunto, y la eólica específicamente, como una de las principales alternativas para atajar muchos de los desafíos que se nos plantean a futuro como sociedad: mitigar el cambio climático a partir de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, reducir nuestra dependencia energética de terceros países y desarrollar industrias que aporten valor añadido y contribuyan a la generación de empleo cualificados que impulsen el cambio de modelo productivo que necesita España. La producción de energías limpias, alternativas y renovables, debe representar a corto y medio plazo una realidad ineludible en el establecimiento de un modelo de desarrollo sostenible.

Entre todas las energías renovables la Eólica tiene actualmente un carácter estratégico dentro del pull energético nacional español, en 2013 llegó a cubrir el 21,1%, lo que convirtió a la energía eólica en la principal fuente de energía eléctrica de España.

Por otro lado, el impacto de la actividad humana en la evolución del clima ha sido fundamentado por numerosísimos estudios realizados por distintas disciplinas científicas, cuyos resultados han sido resumidos en las conclusiones de los informes de evaluación del IPCC. Y aunque la mayoría de los esfuerzos de la comunidad científica se han centrado en el estudio del impacto de los distintos escenarios de cambio climático en los campos de precipitación y temperatura, existe cierto número de publicaciones que estudian el efecto del cambio climático sobre el potencial eólico. Así aplicando distintas técnicas de Downscaling a las salidas de diversos AOGCM's (Atmosphere-Ocean General Circulation Models), se han realizado diversos estudios de las previsiones de variación del potencial eólico que se prevé para el siglo. XXI en diversas zonas del mundo. En España cabría destacar los estudios que han realizado o están realizando diversas instituciones del recurso eólico en el presente:

- El IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía), ha finalizado en 2011 un estudio del recurso eólico para todo el territorio nacional de la Península Ibérica; Islas Canarias, Islas Baleares; Ceuta y Melilla y la zona marítima hasta 24 millas náuticas desde la línea base (Aymami et al, 2011).
- La UM (Universidad de Murcia), ha finalizado en el 2010 el proyecto “Desarrollo de un mapa eólico nacional adaptado a la minieólica” perteneciente al Proyecto Singular Estratégico Fomento de la tecnología de pequeña potencia coordinado por el Ciemat.
- El CENER (Centro Nacional de Energías Renovables) en colaboración con la Universidad de Atenas, ha desarrollado una metodología para el cálculo de mapas de viento a escala regional a partir del modelo de mesoescala SKIRON, obteniendo un mapa de recursos eólicos de la Península Ibérica y Baleares para el presente (Gastón et al., 2008).
- La influencia de la Oscilación del Atlántico Norte en el campo de vientos de la península en primavera ha sido analizada en un trabajo conjunto llevado a cabo por grupos de la Universidad de Segovia, de la Universidad de Murcia y la Universidad Complutense (Martín et al, 2010).

Así, este estudio pretende ser un complemento a los anteriores, al tratar de desarrollar técnicas que permitan estudiar la evolución del potencial eólico en un futuro y aplicar dichas técnicas para obtener la evolución del potencial eólico en la Península Ibérica e Islas Baleares en la primera mitad del siglo XXI para el escenario A1B.

### 3. METODOLOGÍA

La Península Ibérica se puede considerar como una única entidad desde el punto de vista geográfico, pero debido a su complejidad orográfica no se puede hacer esta consideración si se estudia desde el punto de vista eólico, y estudiar cada uno de los puntos de la malla daría lugar a un exceso de información que sería necesario resumir para obtener algún resultado interesante. Por lo cual, en este trabajo, para estudiar la evolución de los vientos en el Península Ibérica, se decide dividir esta en un número óptimo de regiones, de forma que cada región incluya un conjunto de puntos de la malla que tengan un comportamiento similar desde el punto de vista eólico. Para lograr esto desarrollamos una metodología propia que permite dividir la Península Ibérica en regiones con significado desde el punto de vista eólico.

Para regionalizar la Península Ibérica desde el punto de vista eólico, se aplica el método K-means sobre los conjuntos de resultados de velocidad de viento obtenidos por los RCMs del proyecto ESCENA, los cuales tienen una resolución de  $25 \times 25 \text{ km}^2$ . La principal desventaja que presenta el método K-means es que es necesario indicar por anticipado el número de clústeres de la partición. El número de clústeres utilizado en este trabajo es el que minimiza el cociente entre la desviación estándar media de los clústeres y el número de puntos clasificados. Este número óptimo de clústeres es determinado aplicando el siguiente algoritmo para números de clústeres que van desde 5 a 16.

1. Para cada RCM y forzamiento se obtiene la partición correspondiente a cada uno de los números de clústeres arriba mencionados.
2. Las particiones de los RCMs para cada número de clústeres se integran en una sola partición por forzamiento. Para ello se coge como referencia la partición de uno de los RCMs, se compara con las de los demás identificando las regiones equivalentes, de forma que dos regiones de dos modelos distintos se consideran equivalentes si para una región del modelo de referencia no había ninguna región en el segundo modelo con la que tuviera más puntos en común. Una vez identificadas las regiones equivalentes de los distintos modelos, se considera que un punto pertenece a una región de la partición integral si dicho punto pertenece a la misma región equivalente en al menos tres modelos.
3. El punto 2 se repite cogiendo como partición de referencia la de cada uno de los modelos, y se escoge finalmente como partición patrón aquella partición integral que tuviera más puntos clasificados.

Realizando dicho procedimiento se obtiene como resultado 12 particiones distintas, una por cada número de clústeres ( $5 \leq \text{Numero Clústeres} \leq 16$ ), por cada forzamiento. Para decidir el número de clústeres que da la partición óptima se usan los siguientes criterios:

- **Compacidad:** Para ello se utilizó la desviación estándar ya que esta es inversamente proporcional a la compacidad. Luego variando el número de clústeres, de 5 a 16, a utilizar en el método K-means se calculó la desviación estándar media para la partición integral para un número determinado de clústeres, obteniendo así una relación entre el número de clústeres y la compacidad.
- **Similitud** entre las particiones de los distintos modelos para un mismo forzamiento. Para ello se calculó el número de puntos clasificados (es decir, el número de puntos que pertenecen a alguna región de la partición común) en función del número de clústeres. Es parámetro nos permite evaluar cuán buena es una partición desde el punto de vista de cobertura de la Península ya que cuanto más alta es la similitud, más parecida son entre sí las regiones cubiertas por los clústeres equivalentes en los distintos modelos.

Consideramos óptimo el número de clústeres que minimiza el cociente resultante de dividir la desviación estándar media de la partición entre el número de puntos clasificados. Realizando

esto para las particiones correspondientes a cada forzamiento se obtienen los siguientes resultados.

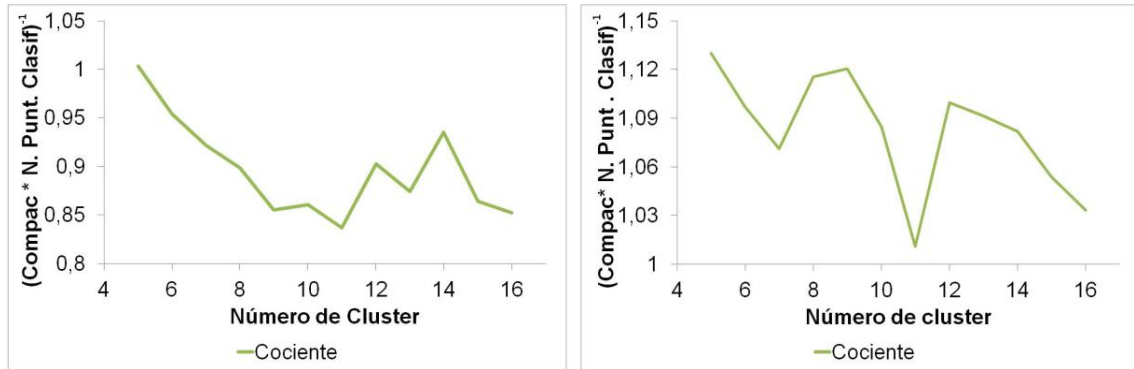
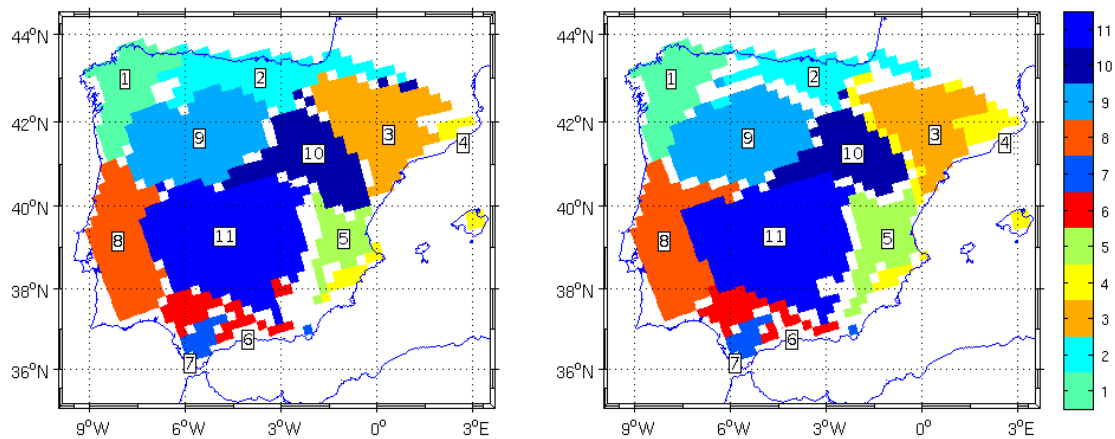


Fig 1: RESULTADOS DE APLICAR EL CRITERIO DEL NÚMERO ÓPTIMO SOBRE LA BASE DE DATOS FORZADA POR ERA-INTERIM (IZQUIERDA) Y SOBRE LA BASE DE DATOS FORZADA POR ECHAM5 (DERECHA).

Para ambos forzamientos el número de clústeres que minimiza el cociente entre la desviación estándar y el número de puntos clasificados es once. Luego usando once como el número óptimo de clústeres, y aplicando el método de regionalización explicado previamente se obtuvieron las particiones que aparecen en la [Fig 2](#). Tal y como se puede apreciar, las particiones obtenidas para ERA-Interim y ECHAM5 tienen una gran semejanza, en la mayor parte de los casos el parecido entre dos áreas equivalentes es superior al 80%, siendo el parecido medio para las dos particiones superior al 90%. Para cuantificar el parecido entre las dos particiones se usó el siguiente criterio.

$$RC = \frac{\text{Area\_comun}}{\text{Area\_total}}$$

Donde, Area\_común es el área que dos regiones equivalentes tienen en común y el Area\_total es el área total de una de las dos regiones. RC cuantifica la fracción de área de una región que está comprendida en la equivalente.



RC	Area_1	Area_2	Area_3	Area_4	Area_5	Area_6	Area_7	Area_8	Area_9	Area_10	Area_11	media
ECHAM5	0,97	1,00	1,00	0,40	0,65	0,92	1,00	0,92	0,97	0,97	0,97	0,91
ERA	1,00	0,70	0,82	0,82	1,00	0,89	1,00	0,96	0,93	0,81	0,97	0,90

Fig 2: PARTICIONES PARA LA PENÍNSULA IBÉRICA E ISLA BALEARES. IZQUIERDA, SERIE DE DATO FORZADA POR ERA-INTERIM. DERECHA, SERIE DE DATO FORZADA POR ECHAM5. RC ENTRE LAS DOS PARTICIONES.

Para validar las regionalizaciones obtenidas, se comparan las particiones del ensemble con cada forzamiento con la partición obtenida de aplicar K-means sobre la base de datos de ECA&D (European Climate Assessment & Dataset). ECA&D es una base de datos diarios meteorológicos de alta calidad obtenidos a partir de estaciones meteorológicas.

Para obtener el número óptimo de clústeres para los datos de ECA&D se utilizó el criterio del codo (Thorndike, 1953) sobre la siguiente expresión obteniéndose la [Fig 3](#)

$$RSD = \frac{SD_1 - SD_N}{N - 1}$$

Esta expresión establece el cambio relativo de la desviación estándar media en función del número de clústeres para una partición de N clústeres ( $SD_N$ ), usando como referencia la desviación estándar de la partición compuesta por un único clúster ( $SD_1$ ). A partir del codo la disminución de la desviación estándar media de la partición con el número de clústeres empieza a ser significativamente menor si se compara con la disminución antes del codo.

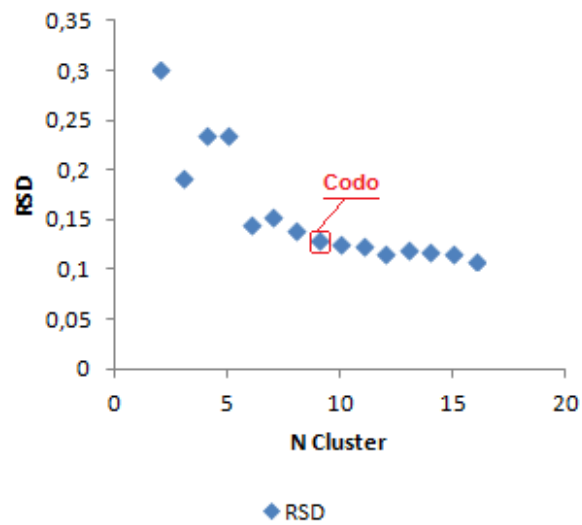


Fig 3: CRITERIO DEL CODO APLICADO SOBRE LA ECUACIÓN RSD EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE CLÚSTERES

Así se obtuvo que el número óptimo de clusters para los datos de ECA&D es nueve, lo que dio lugar a la partición que aparece en la [Fig 4](#).

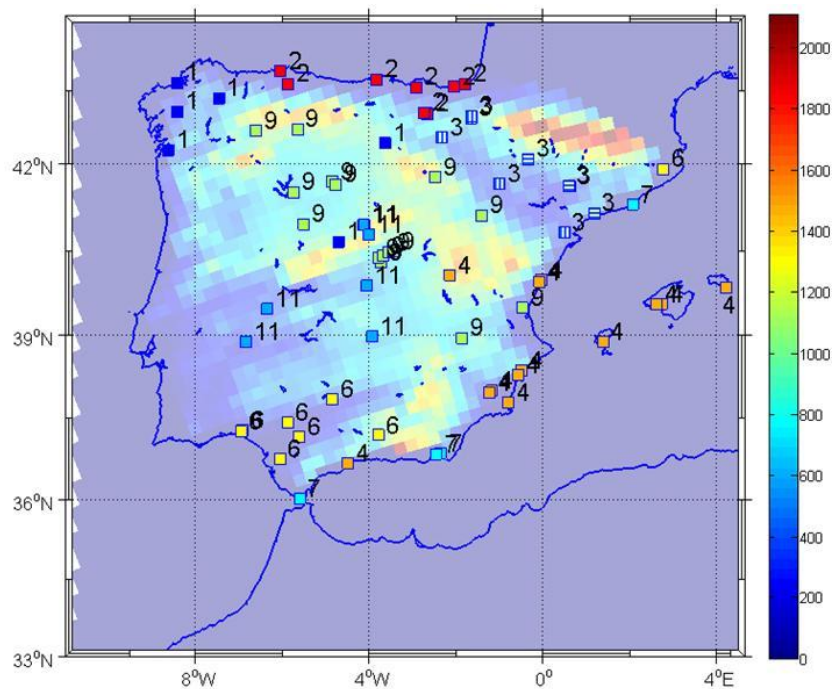


Fig 4: PARTICIÓN DEL CAMPO DE VIENTO DE LA PENÍNULA IBÉRICA E ILA BALEARE OBTENIDA DE APLICAR EL MÉTODO DE K-MEANS SOBRE LOS DATOS DE ECA&D. EL COLOR Y EL NÚMERO DE CLÚSTERES ESTÁ EN

CORRESPONDENCIA CON LA CLASIFICACIÓN DE ERA-INTERIM Y ECHAM5. EL CLUSTER NÚMERO 3 ESTÁ FORMADO POR DOS CLÚSTERES DE ECAD&D.

A partir de la [Fig 2](#) y de la [Fig 4](#) se puede establecer fácilmente una correspondencia cualitativa entre las regiones obtenidas de aplicar K-means sobre los datos de ECA&D y sobre los RCMs para ambos forzamientos, ya que realizar una comparación cuantitativa carece de excesivo sentido, pues se estarían comparando magnitudes distintas, ya que la regionalización de ECA&D se obtuvo a partir de 71 estaciones meteorológicas diseminadas sobre la superficie de la Península Ibérica y Baleares, las cuales pueden estar fuertemente afectadas por los accidentes geográficos locales, cosa que no ocurre con los datos de los RCMs, que representan áreas de la Península Ibérica por lo que los efectos locales se difuminan.

3.1 Validación de los resultados de los RCMs del proyecto ESCENA

Una vez obtenidas las dos particiones, una por cada forzamiento, para comprobar cómo de realistas son los resultados de los RCMs, se obtuvieron las funciones de densidad de probabilidad (PDFs) de la velocidad del viento para cada una de las regiones de la partición de ERA-Interim y se compararon con las PDFs de ECA&D. Las PDFs de ECA&D se obtuvieron integrando las PDFs de las estaciones meteorológicas que pertenecen a cada región de la partición de ERA-Interim en una sola. El criterio utilizado para la comparación fue el PDF Skill score (Perkins et al. 2007) dado por la fórmula

$$S_{score} = \sum_1^n \text{minimum}(Z_m, Z_0)$$

Donde n es el número de partes en la que la PDF está dividida,  $Z_m$  es el valor de la frecuencia de una división de la PDF de los modelos, y  $Z_0$  es el valor de la frecuencia de una división de la PDF de la base de datos de ECA&D. Haciendo esta comparación se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en la Tabla 1 (para el Área 8 no hay estaciones meteorológicas de ECA&D).

Score (%)	Area_1	Area_2	Area_3	Area_4	Area_5	Area_6	Area_7	Area_8	Area_9	Area_10	Area_11	Mean
PROM	77	70	64	82	76	89	85	--	76	71	68	72
WRFB	71	63	56	69	66	83	86	--	66	59	63	64
MM5	68	66	68	74	70	85	87	--	66	62	59	66
REMO	85	89	86	82	85	80	77	--	83	83	72	81
Mean:	75	72	69	77	74	84	84	--	73	69	66	71

Tabla 1: PDF SKILL SCORE DE LAS PDFS DE VELOCIDAD DE VIENTO DE LOS RCMs (REMO, WRFB, PROMES Y MM5), PARA CADA ÁREA DESDE 1989 A 2008. PARTICIÓN ERA-INTERIM.

Como se puede apreciar en la [Tabla 1](#) los RCMs tienen un PDF skill score medio por encima del 70% para ambas particiones con una variabilidad entre el 56% y el 89%, lo que implica que la coincidencia media de la distribución de velocidades de viento de los modelos coincide con el 71% de la distribución de vientos de ECA&D.

#### 4. RESULTADOS

Para estudiar la evolución del potencial eólico entre (1980-2000) y (2030-2050) suponiendo un escenario A1B, se utilizó la partición de ECHAM5, ya que para obtener los resultados de los RCMs para el escenario A1B se utilizó como forzamiento ECHAM5. Para calcular la evolución del potencial eólico se obtuvieron las PDFs de la velocidad del viento para cada uno de los periodos y de las áreas, para posteriormente, utilizando la curva de potencia típica de un aerogenerador de 850kW, traducir las PDFs a potencia eléctrica. Una vez conocido el potencial eólico para cada periodo se calculo la diferencia y se dividió por el potencial eólico para el periodo (1980-2000) con el objeto de obtener la variación del potencial eólico relativo de un periodo respecto al otro. Los resultados obtenidos en tantos por cien aparecen reflejados en la [Tabla 2](#) y en la [Fig 5](#)

Porcentaje (%)	PROMES	WRFB	MM5	REMO	Media
Area 1	-1,8	-2,5	-3,2	-3,9	-2,9±0,9
Area 2	-3,1	-4,0	-4,9	-3,6	-3,9±0,8
Area 3	-4,2	-6,2	-8,9	-5,5	-6,2±2,0
Area 4	-7,4	-6,7	-9,5	-9,3	-8,2±1,4
Area 5	-7,9	-10,9	-11,0	-12,4	-10,6±1,9
Area 6	-7,9	-9,6	-7,4	-9,9	-8,7±1,2
Area 7	-2,3	-2,3	-1,7	-2,4	-2,2±0,3
Area 8	-8,4	-9,1	-8,0	-9,4	-8,7±0,6
Area 9	-5,1	-7,6	-7,7	-7,6	-7,0±1,3
Area 10	-5,8	-7,4	-7,9	-9,2	-7,6±1,4
Area 11	-8,9	-12,2	-10,0	-11,7	-10,7±1,5
Península	-6,4	-8,3	-8,1	-8,6	-7,9±1,3

Tabla 2: EVOLUCIÓN DEL POTENCIAL EÓLICO EN TANTO POR CIEN DE LA PENÍNSULA IBÉRICA E ISLAS BALEARES ENTRE (1980-2000) Y (2030-2050) PARA LAS DISTINTAS ÁREAS. ÁREAS EN VERDE: TENDENCIA MENOS NEGATIVA QUE LA MEDIA DEL MODELO. ÁREAS EN ROJO: TENDENCIA MÁS NEGATIVA QUE LA MEDIA DEL MODELO. ÁREAS EN AMARILLO: PARA ALGUNOS MODELOS LA TENDENCIA ES MÁS NEGATIVA QUE LA MEDIA DEL MODELOS, MIENTRAS QUE PARA OTROS NO.



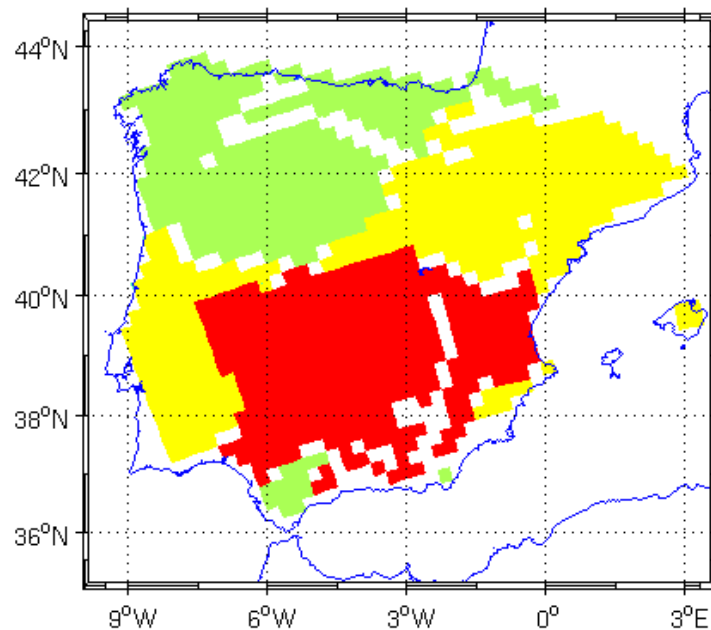


Fig 5: EVOLUCIÓN DEL POTENCIAL EÓLICO ENTRE (1980-2000) Y (2030-2050) PARA LAS DISTINTAS ÁREAS USANDO COMO REFERENCIA LA MEDIA DE CADAMODELO. ÁREA EN VERDE: ÁREA CUYA TENDENCIA ES MENOS NEGATIVA QUE LA MEDIA DE CADA MODELO PARA TODOS LOS MODELOS. ÁREA EN ROJO: ÁREA CUYA TENDENCIA ES MÁS NEGATIVA QUE LA MEDIA DE CADA MODELO PARA TODOS LOS MODELOS. ÁREA EN AMARILLO: ÁREA CUYA TENDENCIA ES MÁS NEGATIVA QUE LA MEDIA DE CADA MODELO PARA ALGUNOS MODELOS MIENTRAS QUE PARA OTROS NO.

## 5. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado una metodología basada en la técnica de K-means para la obtención de zonas en la península Ibérica e islas Baleares equivalentes desde el punto de vista eólico, que permite la integración de los resultados de diversos RCMs. Las regiones obtenidas con ayuda de esta nueva metodología son prácticamente independientes del forzamiento usado, tal y como se puede observar en la [Fig 2](#).

También se observa una fuerte correlación entre los accidentes orográficos y las particiones obtenidas, generalmente a dichas particiones siempre se le puede asociar algún accidente orográfico, así de forma clara el Área 2 con la cornisa cantábrica, el Área 3 con el valle del Ebro, Área 6 valle del Guadalquivir, Área 9 sub-meseta norte, Área 11 sub-meseta sur.

En cuanto a la evolución del viento en el escenario estudiado, la comparación del potencial eólico entre el periodo de futuro 2030-2050 y el periodo 1980-2000, utilizado como referencia, muestra una disminución en todas las zonas de la Península Ibérica, siendo esta reducción más acusada en las regiones del Sur de la Península que en las del Norte, si se exceptúa el área del estrecho de Gibraltar, donde esta tendencia a la disminución es menor que en las regiones adyacentes.

## 6. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

Aymamí J., García A., Lacave O., Lledó L., Mayo M., Parés S. de Meteosim Truewind (2011). Análisis del Recurso. Atlas Eólico de España. IDAE.

Gastón M., Pascal E., Frías L., Martí I., Irigoyen U., Cantero E., Lozano S., Loureiro Y. (2008) Wind resources map of Spain mesoscale. Methodology and validation. Wind Energy Department, National Renewable Energy Center (CENER)

Martín M. L., Valero F., Morata A., Luna M. Y., Pascual A. (2010). Springtime coupled modes of regional wind in the Iberian Peninsula and large-scale variability patterns. *International Journal of Climatology*, DOI: 10.1002/joc.2127

Perkins S. E., Pitman A. J., Holbrook N. J., McAneney J. (2007): Evaluation of the AR4 Climate Models' Simulated Daily Maximum Temperature, Minimum Temperature, and Precipitation over Australia Using Probability Density Functions. *Journal of Climate*. DOI:10.1175/JCLI4253.1

Thorndike R. L. (1953). "Who Belong in the Family?". *Psychometrika* 18 (4): 267-276

Vergés J. and Fernández M. (2006). Ranges and basins in the Iberian Peninsula: their contribution to the present topography. Group of Dynamics of the Lithosphere (GDL), Institute of Earth Sciences 'Jaume Almera', CSIC, 08028 Barcelona, Spain