

Universida<sub>de</sub>Vigo

Faculta<sub>de</sub>Ciencias

# **Evaluación del potencial eólico de la cuenca del Mediterráneo bajo los escenarios RCP45 y RCP85**

**Trabajo Fin de Grado  
Grado de Ciencias Ambientales**

**Estefanía Escudero Díaz**



**Dra. M<sup>a</sup> de las Nieves Lorenzo González**, profesora titular del área de Física de la Tierra, del departamento de Física Aplicada, de la Universidad de Vigo y **Dra. M<sup>a</sup> Inés Álvarez Fernández** investigadora del área de Física de la Tierra, del departamento de Física Aplicada, de la Universidad de Vigo

INFORMAN:

Que el trabajo titulado "**Evaluación del potencial eólico de la cuenca del Mediterráneo bajo los escenarios RCP45 y RCP85**" presentado por **D<sup>a</sup>./D. Estefanía Escudero Díaz**, con **D.N.I.: 45140082Y**, ha sido realizado bajo nuestra dirección en el departamento de Física Aplicada de la Universidad de Vigo, y autorizamos su presentación como **Trabajo Fin de Grado del Grado de Ciencias Ambientales** al considerarlo apto para ser defendido.

Ourense, 20 de febrero de 2017

D<sup>a</sup>. M<sup>a</sup> de las Nieves Lorenzo González

D<sup>a</sup>. M<sup>a</sup> Inés Álvarez Fernández



# Resumen

En la sociedad actual el desarrollo y crecimiento de muchos países conlleva un incremento de sus necesidades energéticas. Hasta hace pocos años, la principal fuente de energía eran los combustibles fósiles, pero el papel que tienen en los cambios climáticos que ocurren a nivel mundial, ha provocado un gran interés a nivel internacional por el desarrollo de las energías renovables y así poder llevar a cabo un desarrollo sostenible. El desarrollo de este tipo de energía permite la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, en especial del CO<sub>2</sub>.

Una de las energías renovables más destacada es la energía eólica, la cual aprovecha la energía generada por masas de aire en movimiento. Esta energía se extrae en los parques eólicos que se instalan en zonas con altas probabilidades de viento constante, tanto en áreas de superficie terrestre (onshore) como en zonas marinas (offshore). Sin embargo, el recurso eólico es susceptible a los cambios climáticos que podrían ser beneficiosos o perjudiciales para la evolución de este tipo de energía en función de la región considerada.

En este estudio se trata de evaluar de forma detallada el impacto del cambio climático en los vientos en superficie, y como consecuencia en la potencia eólica, en el mar Mediterráneo. En este trabajo se llevará a cabo el análisis de las simulaciones de EURO-CORDEX con el modelo climático regional (RCA4) forzado por los modelos climáticos globales CNRM, ICHEC y MPI, bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, definidos por el IPCC.

Con esto se espera obtener una visión futura de los cambios en la potencia eólica y así conocer la rentabilidad de la instalación de parques eólicos en esta zona para un futuro cercano.



# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1. La energía eólica.....	2
1.2. El cambio climático.....	5
1.3. Objetivos.....	7
<b>2. DATOS Y MÉTODOS</b> .....	9
2.1. Área de estudio.....	9
2.2. Datos de CORDEX .....	10
2.3. Métodos.....	12
2.3.1. Diagramas de Taylor.....	13
2.3.2. Test de Wilcoxon Rank Sum.....	16
<b>3. RESULTADOS</b> .....	17
3.1. Condiciones climáticas recientes.....	17
3.2. Proyecciones climáticas.....	24
3.2.1. Cambios en la velocidad de viento.....	25
3.2.2. Cambios en la potencia eólica.....	35
<b>4. CONCLUSIONES</b> .....	47
<b>5. REFERENCIAS</b> .....	51



# 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, gran parte de la energía que se consume proviene de fuentes de energía no renovables, que son aquellas que se encuentran de forma limitada en el planeta y cuya velocidad de consumo es mayor que la de regeneración y producen residuos difíciles de eliminar (carbón, petróleo y gas natural). Sin embargo, solo una pequeña parte de esa energía consumida proviene de fuentes de energía renovables, que es aquella que se obtiene de fuentes naturales inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen o porque son capaces de regenerarse por medios naturales y que además no contamina ya que los residuos que producen se pueden eliminar a la misma velocidad que se generan (e. eólica, e. geotérmica, e. hidroeléctrica, e. mareomotriz, e. solar, e. undimotriz, biomasa y biocarburantes).

Por sus características, es necesario concienciar a la sociedad sobre la importancia del uso de energías renovables, para que poco a poco gran parte de la energía consumida provenga de fuentes renovables, ya que el aprovechamiento de recursos renovables tiene ventajas como una disminución de la emisión de los gases de efecto invernadero (GEI), menor dependencia energética y un aumento en el desarrollo tecnológico para el aprovechamiento de estas.

A nivel mundial, se ha observado un aumento anual en la demanda energética, especialmente de aquellos países en desarrollo y se espera que este aumento sea mayor en el futuro, un 40% mayor que actualmente (Boletín edición especial 2015, World Wind Energy Association, WWEA). Este aumento también provocará un aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero en las próximas décadas. Esto preocupa al Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), ya que no ve efectivas las políticas adoptadas por los distintos gobiernos para contrarrestar estas emisiones si no se invierte en las energías renovables para que gradualmente vayan sustituyendo a las energías no renovables.

A nivel Europeo, existen políticas comunitarias e internacionales con el objetivo de disminuir la emisión de GEI y aumentar la producción y el consumo de energías renovables, las cuales

se encuentran en el denominado objetivo 20-20-20 (Estrategia Europa 2020). Este plan propuesto por la Unión Europea en marzo de 2007 propone alcanzar los siguientes objetivos para el año 2020 respecto a 1990:

1. Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 20%.
2. Ahorrar el 20% del consumo de energía mediante una mayor eficiencia energética. Además, en cada país el 10% de las necesidades del transporte deberán cubrirse mediante biocombustibles.
3. Promover las energías renovables de manera que el 20% de la energía consumida provenga de éstas.

En octubre de 2014, la Unión Europea acordó un nuevo objetivo de ahorro energético del 27% o más para el año 2030.

A pesar de ser un importante compromiso por parte de los países pertenecientes a la Unión Europea que se encuentran adheridos a este plan, se pone en duda que todos lleven a cabo las medidas necesarias para alcanzar dichos objetivos.

## **1.1 La energía eólica**

Dentro de las fuentes de energías renovables, una de las más destacadas es la energía eólica, la cual aprovecha la energía generada por masas de aire en movimiento. Esta energía se extrae en los parques eólicos, que son zonas en las que se instalan aerogeneradores tanto en áreas de superficie terrestre (onshore) como en zonas marinas (offshore).

Este tipo de energía es una opción viable para aumentar la producción de energía baja en emisiones de CO<sub>2</sub>. En 2007 la energía eólica generada contribuyó en más del 1% de la demanda mundial y en 2009 fue capaz de responder entorno a un 1,8% de la demanda de electricidad mundial.

Debido al constante crecimiento de la demanda de energías renovables, se espera que la energía eólica instalada cubra más del 20% de la demanda mundial en el año 2050. Actualmente, el ranking de países con mayor capacidad eólica terrestre instalada está liderado principalmente por países desarrollados o emergentes (Figura 1.1). En primer lugar se encuentra China, líder mundial en la emisión de gases que causan el cambio climático y la contaminación atmosférica pero que desde 2008 se ha volcado en el desarrollo de las

energías renovables especialmente en la eólica para paliar sus problemas de contaminación atmosférica.

A continuación, con una gran diferencia, se encuentra Estados Unidos, seguido por Alemania, India y España (Informe Global del viento: actualización anual del mercado (2016), Global Wind Energy Council, GWEC).

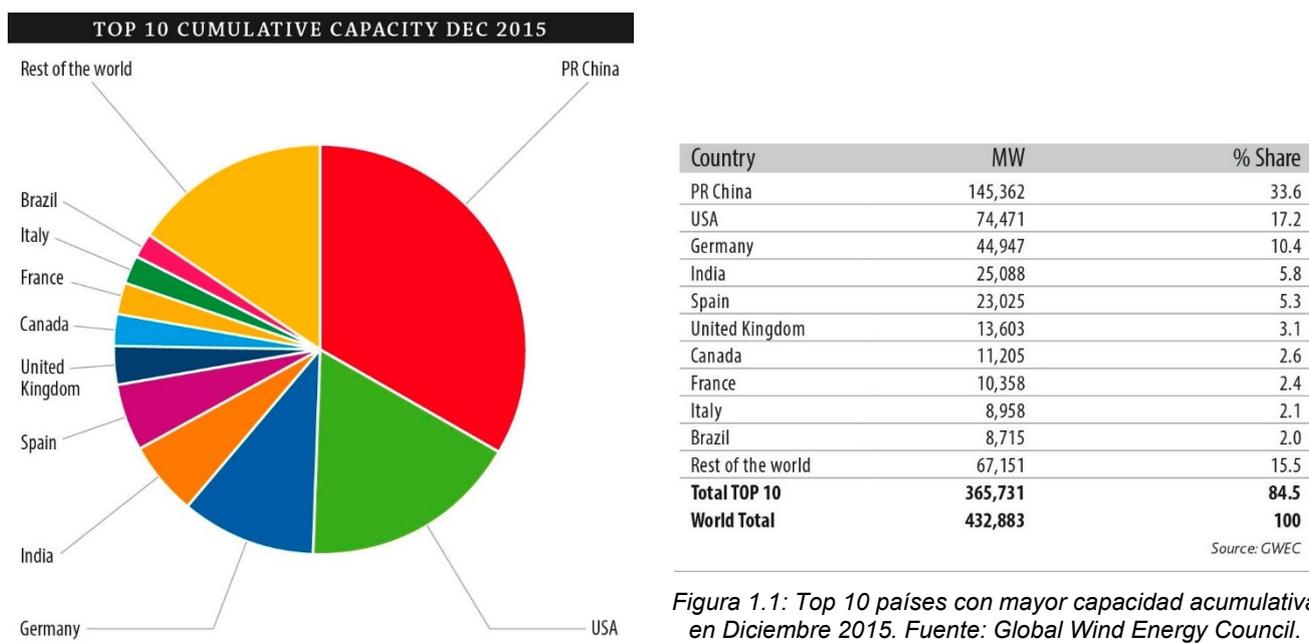


Figura 1.1: Top 10 países con mayor capacidad acumulativa en Diciembre 2015. Fuente: Global Wind Energy Council.

- Energía eólica terrestre (onshore):

El potencial eólico terrestre se ha usado como fuerza motriz desde hace siglos, los molinos para moler cereales son ejemplo de ello. A finales del siglo XIX, surgió la idea de generar electricidad utilizando el viento. No obstante durante la mayor parte del siglo XX, el bajo precio de los combustibles fósiles hizo que esta tecnología energética tuviera un escaso desarrollo. En los años 70, la gran subida del precio del petróleo propició que la energía eólica comenzara a desarrollarse muy rápidamente y actualmente es una de las tecnologías energéticas que más crece cada año.

Hoy en día, esta energía, ha alcanzado prácticamente su máximo desarrollo y se pueden encontrar parques eólicos terrestres en un gran número de países que abastecen una parte importante de su consumo con este tipo de energía. Este desarrollo ha provocado que los costes de producción y exportación se reduzcan beneficiando así la riqueza del país productor y lo más importante, convirtiéndola en una potencial sustituta de los combustibles fósiles.

Sin embargo, también tiene sus inconvenientes. Entre ellos encontramos que la disponibilidad de viento no es constante, muy bajas o muy altas tasas de viento imposibilitan el uso de los aerogeneradores, a pesar del desarrollo siguen teniendo un alto coste de producción y a pesar del aumento de energía generada, no se tienen dispositivos de almacenamiento suficientes.

El continente europeo es la región del planeta con mayor concentración de parques eólicos y esto se debe a las medidas políticas medioambientales tomadas por la Unión Europea que impulsaron y facilitaron el crecimiento y desarrollo de este tipo de energía.

- Energía eólica marina (offshore):

En los últimos años, se está tratando de aprovechar el viento que se encuentra en zonas marinas. El coste de instalación en el mar es muy superior al de instalación en tierra, pero tiene ventajas con respecto a los parques terrestres. La principal es que en el mar la velocidad del viento es más constante debido a la ausencia de obstáculos que varíen o ralenticen los vientos. El viento en el mar es menos turbulento ya que la variación de temperaturas de las capas de aire es menor que sobre tierra. Esto hace que su periodo de trabajo sea mayor. Además, la ubicación de los parques mar adentro, disminuye el impacto visual y acústico, lo que permite utilizar aerogeneradores mayores y más eficaces. El inconveniente más importante, ya mencionado, de los parques de energía eólica marina es el del coste de inversión, principalmente por la construcción de las cimentaciones que actualmente se encuentran limitadas a profundidades medias no muy superiores a los 50 m. La instalación de plataformas flotantes en aguas profundas parece ser la solución aunque dicha tecnología aun no está plenamente comercializada. No obstante, dichas instalaciones, junto con las nuevas tecnologías en alta mar, representan una atractiva oportunidad de inversión ya que ofrece la oportunidad de generar más energía que un parque terrestre de características similares.

Actualmente se trata de buscar las zonas marinas más adecuadas para el aprovechamiento del viento. Por el momento, las zonas consideradas más idóneas son: el mar Negro, la costa atlántica de la Península Ibérica, Norteamérica, determinadas zonas del mar Mediterráneo, el norte de Europa y noreste de Asia (WWEA).

En Europa se cuenta con 6GW de potencia acumulada de parques eólicos marinos pertenecientes a países líderes en este sector como: Reino Unido, Dinamarca, Holanda y Suecia. Se espera que en el año 2020 el 30% de la potencia eólica instalada pertenezca a la energía eólica marina.

## 1.2 Cambio climático

El estudio del clima es un campo complejo y en rápida evolución, debido a la gran cantidad de factores que intervienen. Se llama cambio climático a la variación global del clima de la Tierra. Este puede ser debido a causas naturales y también a la acción del hombre y se produce a muy diversas escalas de tiempo y sobre todos los parámetros climáticos: temperatura, precipitaciones, viento, etc.

Aquí nace el término “efecto invernadero”, que se refiere a la retención del calor del Sol en la atmósfera por parte de una capa de gases (GEI). Sin ellos la vida no sería posible ya que el planeta sería demasiado frío. Entre estos gases, además del vapor de agua, se encuentran el dióxido de carbono, el óxido nitroso y el metano, que son liberados por la industria, la agricultura y la combustión de combustibles fósiles. El mundo industrializado ha conseguido que la concentración de estos gases haya aumentado un 30% desde el siglo pasado alterando el equilibrio natural de las emisiones.

Actualmente el IPCC contempla la idea de que nuestro modo de producción y consumo energético está generando una alteración climática global, que provocará serios impactos tanto sobre la tierra como sobre los sistemas socioeconómicos.

Algunas de las consecuencias de esta alteración climática se pueden ver reflejadas en las fuentes de energías renovables. En el caso de la energía eólica, esta se podría ver afectada tanto positivamente como negativamente, dependiendo de la región considerada, ya que es muy susceptible a los cambios climáticos. Esto se debe a que este tipo de energía depende de las condiciones climáticas. El recurso de la energía eólica se controla por la velocidad del viento y por lo tanto se determina por la circulación atmosférica.

En Europa se espera que se produzcan cambios en la velocidad del viento durante el siglo XXI debido al aumento de gases de efecto invernadero. Según esto la cuestión principal es ¿qué impacto podría tener el cambio climático sobre la producción de energía eólica? Para obtener una respuesta se usan modelos climáticos globales y regionales que se emplean para simular un clima futuro, asociados a escenarios de emisión definidos por el IPCC.

Un modelo climático global (GCM) puede proporcionar información de predicción en escalas de entorno a los 100 años con mallas que recorren todo el planeta. Así, nos pueden proporcionar proyecciones de cómo el clima de la tierra puede cambiar en el futuro. Estos resultados son la principal herramienta con la que cuenta la comunidad internacional para tomar decisiones sobre la mitigación del cambio climático. Sin embargo, los impactos del

cambio climático y las estrategias de adaptación para tratar con ellos, deben analizarse en escalas regionales con espaciados de mallas inferiores a los 20km.

Los modelos climáticos regionales (RCM) se aplican sobre áreas limitadas. Para ejecutar estos modelos se pueden utilizar como condiciones iniciales y de contorno los resultados proporcionados por los modelos globales. Así, los RCM pueden proporcionar información sobre regiones mucho más pequeñas con mayor resolución orográfica lo que permite una mayor fiabilidad en el impacto. Esto puede ser trascendental en regiones vulnerables.

Los escenarios describen líneas evolutivas plausibles de las condiciones climáticas y otros aspectos del futuro, principalmente relacionados con aspectos socio-económicos, las emisiones de los GEI y aerosoles asociados. En el Quinto Informe del IPCC (2013) se han definido cuatro nuevos escenarios de emisión, los denominados Trayectorias de Concentración Representativas (RCP). Éstos se caracterizan por su Forzamiento Radiativo (FR) total para el año 2100, que oscila entre 2,6 y 8,5 W/m<sup>2</sup>.

En estos nuevos RCP (Tabla 1.1) se define un escenario en el que los esfuerzos de mitigación conducen a un nivel de forzamiento muy bajo (RCP 2.6), dos escenarios de estabilización (RCP 4.5 y RCP 6.0) y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de GEI (RCP 8.5). Estos escenarios contemplan los efectos de las políticas orientadas a limitar el cambio climático del siglo XX frente a los escenarios de emisión utilizados en el Cuarto Informe del IPCC (2007), que no consideraban los efectos de las posibles políticas y acuerdos internacionales considerados para mitigar las emisiones.

Tabla 1.1: Escenarios RCP Fuente: IPCC. WGI "Cambio Climático: Bases Físicas", 2013.

	FR	Tendencia del FR	[CO <sub>2</sub> ] en 2100
RCP 2.6	2,6 W/m <sup>2</sup>	Decreciente en 2100	421 ppm
RCP 4.5	4,5 W/m <sup>2</sup>	Estable en 2100	538 ppm
RCP 6.0	6,0 W/m <sup>2</sup>	Creciente en 2100	670 ppm
RCP 8.5	8,5 W/m <sup>2</sup>	Creciente en 2100	936 ppm

### 1.3 Objetivos

Actualmente la mayor parte de la energía que se consume procede de fuentes no renovables, y existe un gran abuso de las energías fósiles. Esto produce una gran cantidad de emisiones de GEI a la atmósfera, y según las previsiones, este efecto irá en aumento debido a la mayor demanda energética que se irá produciendo.

El uso de energía eólica marina es una de las mejores opciones para reducir la dependencia energética de los combustibles fósiles y ayudar así a mitigar el cambio climático global. Sin embargo, antes de hacer una inversión de este tipo hay que asegurarse de que las condiciones climáticas no cambien como consecuencia del actual cambio climático global. Esto conlleva a que el estudio inicial para la construcción de un parque eólico marino productivo y rentable no ha de limitarse solo a la evaluación de las actuales condiciones climáticas sino que debería valorar si esas condiciones favorables se mantendrán durante los próximos años.

El objetivo de este trabajo es evaluar el impacto del cambio climático en los vientos en superficie así como el potencial de la energía eólica en el mar Mediterráneo bajo dos escenarios de calentamiento futuro (RCP 4.5 y RCP 8.5) utilizando simulaciones de viento de un modelo regional del proyecto CORDEX.

En la actualidad, el proyecto CORDEX proporciona proyecciones climáticas regionales considerando las simulaciones climáticas globales de los experimentos a largo plazo hasta el año 2100. Estas proyecciones futuras se basan en nuevos escenarios climáticos futuros. En comparación con sus predecesores, estos escenarios climáticos futuros consideran una cantidad cada vez mayor de datos, tales como aspectos socioeconómicos, tecnologías emergentes, uso de la tierra y cambios en la cobertura de la tierra (Moss et al., 2010). Además, estas simulaciones proporcionan datos de alta resolución espacial centrándose en espaciados de malla de aproximadamente 12 km (0,11 grados).

Con esto se espera obtener una visión futura de los cambios en los vientos de superficie y en la potencia eólica y así conocer las zonas más idóneas para la instalación de parques eólicos en la cuenca mediterránea en un futuro cercano.



## 2. DATOS Y MÉTODOS

### 2.1 Área de estudio

El mar Mediterráneo (Figura 2.1) está situado en el sur de Europa. Posee 2,5 millones de km<sup>2</sup> y 3.860 km de longitud. Sus aguas bañan la península Ibérica, Itálica y Balcánica en el sur de Europa y la península Anatolia de Asia. Se comunica con el océano Atlántico a través del estrecho de Gibraltar, con el mar Negro por los estrechos del Bósforo y de los Dardanelos y con el mar Rojo por el canal de Suez.



Figura 2.1: Mar Mediterráneo y países limítrofes Fuente: Google maps.

El clima mediterráneo se caracteriza por ser un clima templado, con inviernos templados y lluviosos y veranos secos y calurosos, con otoños y primaveras variables. Las lluvias no suelen ser muy abundantes, aunque hay zonas donde se sobrepasan los 1.000 mm. Las temperaturas se mantienen, en promedio, todos los meses por encima de los 20°C pero presentan variación estacional, hay meses fríos por debajo de los 18°C y meses cálidos que sobrepasan los 22°C.

La región mediterránea, en la cual se centrará este trabajo, se caracteriza por tener una alta densidad de población, por lo tanto, posee una alta demanda energética. Esta necesidad de energía, ha llevado a pensar que el mar Mediterráneo podría ser un lugar idóneo para la obtención de energía mediante el aprovechamiento del viento (Balog et al., 2016).

## 2.2 Datos de CORDEX

Los datos de viento utilizados en este estudio pertenecen al proyecto CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment) promovido por el WCRP (World Climate Research Programme). Este proyecto pretende organizar un marco coordinado internacionalmente para producir proyecciones regionales de cambio climático en todo el mundo.

Dentro de este proyecto se consideran diferentes regiones del planeta denominadas dominios. En el presente trabajo se utilizarán los datos del dominio centrado en Europa, conocido como EURO-CORDEX (Figura 2.2).

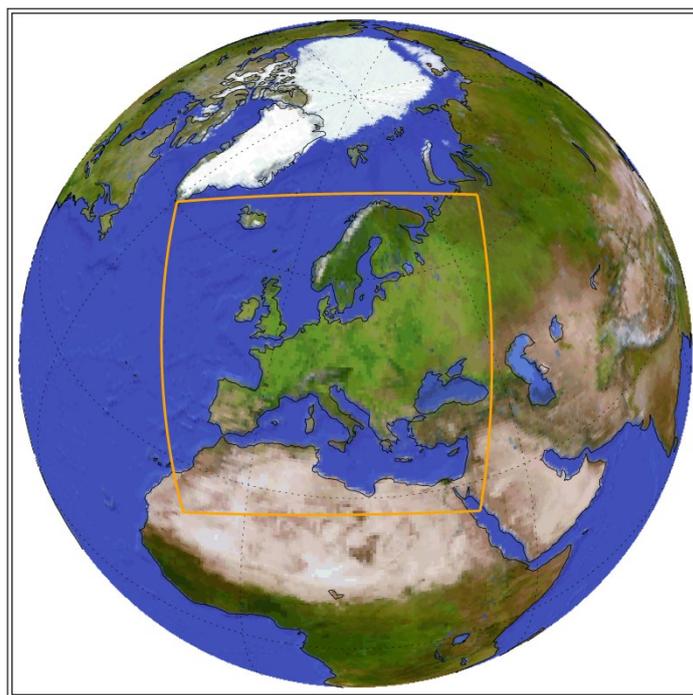


Figura 2.2: Límites del dominio EURO-CORDEX. Fuente: (<http://www.euro-cordex.net/>).

Las simulaciones de este dominio están disponibles para dos resoluciones espaciales: aproximadamente 50 km (0,44 grados) y 12 km (0,11 grados) (<http://www.euro-cordex.net/>).

En este caso se usarán datos diarios de viento en superficie (10 m) correspondientes a la malla de 12 km proporcionados por un modelo regional (RCA4), forzado por tres modelos globales diferentes (CNRM-CM5, ICHEC-EC-EARTH, MPI-ESM-LR).

Los datos de velocidad del viento derivados de los RCM se extrapolan desde los 10 metros de altura hasta 120 metros, que es la altura típica de un aerogenerador marino.

La extrapolación se calcula asumiendo un perfil de viento logarítmico para condiciones neutras, en las que los efectos térmicos han sido descartados (Hoogwijk et al., 2004; Koletsis et al., 2015).

$$V_H = V_{10} \frac{\ln\left(\frac{H}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{10}{z_0}\right)}$$

H: altura de la turbina.

$V_H$ : velocidad del viento a la altura de la turbina.

$V_{10}$ : Velocidad del viento a 10 metros de altura.

$z_0$ : Longitud de rugosidad (0,001 m para mar abierto en calma)

La energía eólica marina se puede estimar a través del potencial de energía eólica (WP):

$$WP = \frac{1}{2} \rho V_H^3$$

$V_H$ : velocidad del viento a la altura de la turbina.

$\rho$ : Densidad del aire (1,225 kg/m<sup>3</sup>).

Para llevar a cabo una evaluación de cómo los modelos simulan las condiciones climáticas, se utilizará la simulación obtenida con el modelo regional RCA4 forzado con los datos del reanálisis ERA-Interim, también presente en el proyecto EURO-CORDEX. Esta simulación es considerada como si fueran los datos reales de viento y se comparará con las simulaciones del RCA4 forzado con los modelos globales para el periodo 1980-2005, viendo así las desviaciones o sesgos que estos puedan presentar.

El impacto del cambio climático en el potencial de la energía eólica se va a caracterizar considerando las diferencias entre un futuro cercano (2021-2060) con respecto al periodo

histórico (1971-2005). Los datos futuros del viento se obtendrán de las proyecciones climáticas para dos escenarios, RCP 4.5 y RCP 8.5.

El escenario RCP 4.5 es un escenario de estabilización, en el que para el año 2100, el forzamiento radiativo es de  $4,5 \text{ W/m}^2$ , sin haber excedido este valor anteriormente (Thomson et al., 2011). Para lograr este objetivo, se suponen políticas climáticas que incluyen la penalización del uso combustibles fósiles. Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) llegan a su máximo alrededor del año 2040 y comienzan a bajar hasta el año 2080, cuando se estabilizan. En este caso, la población mundial llega a 9 mil millones en 2065 y se reduce a 8,7 mil millones en 2100. El PIB mundial crece un orden de magnitud y la demanda energética 3 órdenes de magnitud.

El escenario RCP 8.5 muestra un forzamiento radiativo de  $8,5 \text{ W/m}^2$  que crece en el año 2100. Representa una vía en la que las emisiones y las concentraciones son altas. Sus principales supuestos socioeconómicos incluyen un alto crecimiento de poblaciones, un relativo bajo crecimiento de PIB, con tasas modestas de cambios tecnológicos y de eficiencia energética. Esto lleva a una importante demanda energética y consecuentes emisiones de GEI. En este escenario no se implementan políticas de cambio climático.

### **2.3 Métodos**

Todas las figuras realizadas para este estudio se han elaborado con el programa MATLAB (MATrix LABoratory). Este consiste en un software matemático, optimizado para resolver problemas de ingeniería y científicos. Cuenta con un lenguaje de programación propio y dispone de una serie de rutinas de cálculo estadístico y visualización que trabajan con los datos en forma matricial. Posee un entorno interactivo de fácil manejo e incluye las siguientes posibilidades: visualización gráfica de las series temporales, patrones espaciales, regresión y modelos temporales, análisis de componentes principales, validación probabilística, etc. Los gráficos integrados facilitan la visualización de los datos y la obtención de información a partir de ellos (MathWorks-MATLAB). En la Figura 2.3 se puede ver un ejemplo de uno de los programas utilizados.

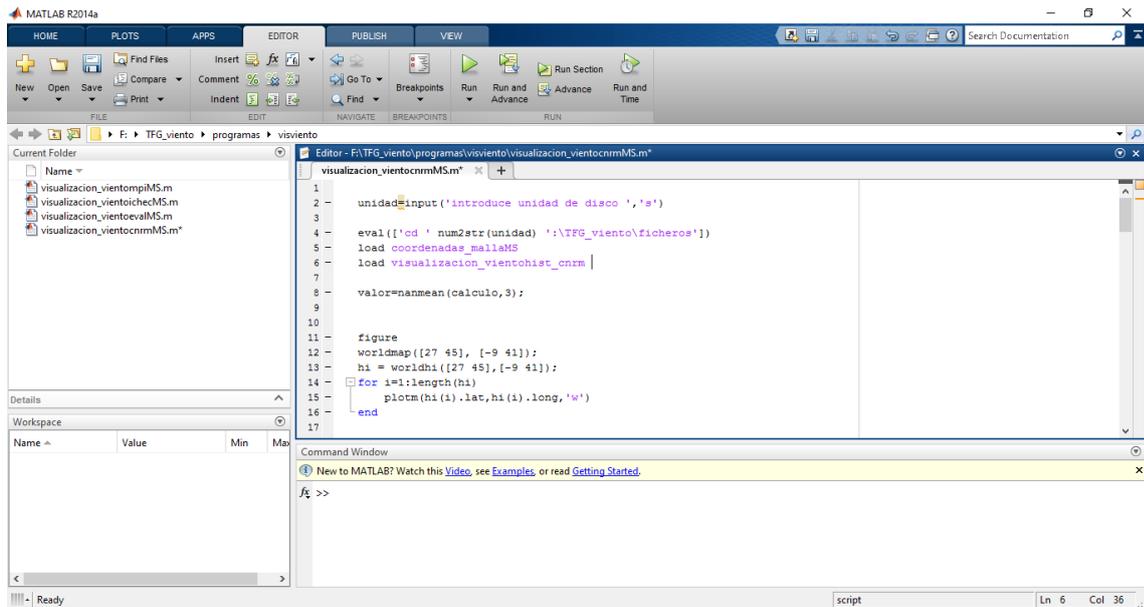


Figura 2.3: Interface MATLAB.

### 2.3.1 Diagramas de Taylor

Los diagramas de Taylor (Taylor, 2001) proporcionan una manera de resumir gráficamente cómo de cerca un patrón o conjunto de patrones coincide con las observaciones. La similitud entre dos patrones se cuantifica en términos de su correlación, su diferencia de la raíz cuadrática media centrada y la amplitud de sus variaciones (representada por la desviación estándar). Estos diagramas son especialmente útiles al evaluar múltiples aspectos de los modelos complejos o en medir la habilidad relativa de muchos modelos diferentes (IPCC, 2001; Bazo et al., 2014).

En la Figura 2.4 podemos observar un ejemplo de diagrama de Taylor que muestra cómo se puede usar para resumir la habilidad con que varios GCM simulan el patrón espacial de la media anual de precipitación. Se calcularon las estadísticas para ocho modelos y se le asignó una letra a cada modelo. La posición de cada letra cuantifica cuán de similar es el patrón de precipitación del modelo con el de las observaciones. Las líneas azules indican la correlación del patrón simulado con el patrón de las observaciones, los círculos verdes muestran la raíz cuadrática media (RMS), la desviación típica estándar del patrón es proporcional a la distancia radial desde el origen.

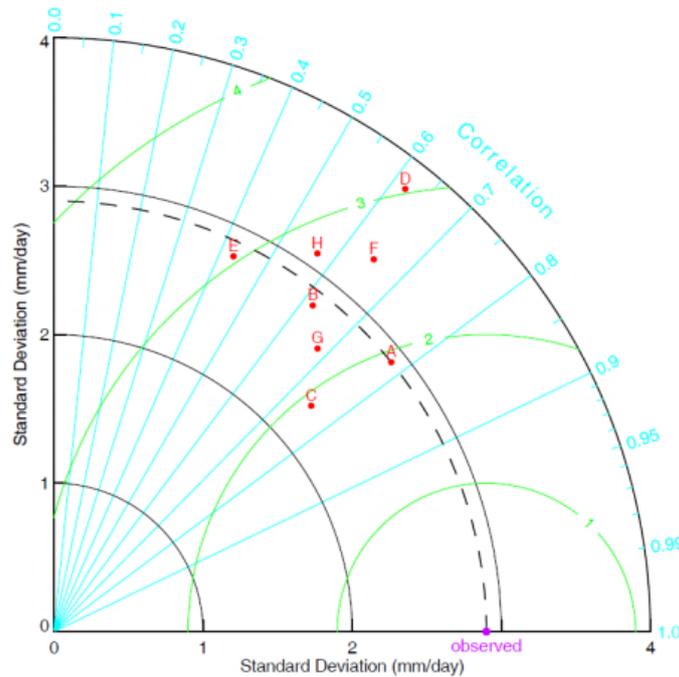


Figura 2.4: Ejemplo diagrama de Taylor. Fuente: (Bazo et al., 2014).

Los patrones simulados que están de acuerdo con las observaciones se encuentran más cerca del punto marcado “observed” en el eje X. Estos modelos tendrán una correlación relativamente alta y errores RMS bajos. Los modelos que se sitúen sobre el arco de trazos tendrán la desviación estándar correcta o acorde con la de las observaciones (lo que indica que las variaciones de patrones presentan una amplitud apropiada).

Para los cálculos de correlación se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson y la prueba test de Student para determinar la significación estadística de dichas correlaciones. El coeficiente de correlación de Pearson mide el grado de asociación lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas, y puede calcularse dividiendo la covarianza de ambas entre el producto de las desviaciones típicas de las dos variables. El valor resultante no depende de las unidades de medida.

$$r_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{S_x S_y}$$

El valor de  $r_{xy}$  está comprendido entre el -1 y 1. El valor de r será positivo si existe una relación directa entre ambas variables, esto es, si las dos aumentan al mismo tiempo. Será negativo si la relación es inversa, es decir, cuando una variable disminuye a medida que la otra

aumenta. Un valor de +1 ó -1 indicará una relación lineal perfecta entre ambas variables, mientras que un valor 0 indicará que no existe relación lineal entre ellas. Hay que tener en consideración que un valor 0 no indica necesariamente que no exista correlación, ya que las variables pueden presentar una relación no lineal.

Una vez que se ha calculado el coeficiente de correlación de Pearson puede realizarse un sencillo test de hipótesis, basado en este caso en la distribución de t-Student, para valorar la significación del coeficiente de correlación y confirmar si existe o no una asociación estadísticamente significativa entre ambas características. Estudiar la significación estadística del coeficiente de correlación es determinar si  $r$  es estadísticamente diferente de 0.

En la distribución de t-Student se realiza una conversión de la distribución de los valores  $r$  a una distribución de t-Student mediante su estandarización:

$$t = \frac{r}{S_r}$$

Siendo  $S_r$  la desviación estándar muestral de los valores de  $r$ , calculada a partir de la siguiente fórmula:

$$S_r = \sqrt{\frac{1 - r^2}{n - 2}}$$

Sustituyendo se obtiene:

$$t = \frac{r}{\sqrt{\frac{1 - r^2}{n - 2}}} \text{ con grados de libertad } gl = n - 2$$

La media cuadrática o RMS (Root Mean Square) de un conjunto de valores ( $X_1, X_2, \dots, X_N$ ) es una medida de posición central. Esta se define como la raíz del promedio de los elementos al cuadrado.

$$RMS = \sqrt{\frac{X_1^2 + X_2^2 + \dots + X_N^2}{N}}$$

La desviación típica o estándar es la medida de dispersión ( $S$ ) asociada a la media. Mide el promedio de las desviaciones de los datos de una muestra ( $X_1, X_2, \dots, X_N$ ) de la media ( $X$ ) en

las mismas unidades de los datos. Dicho de otra forma, es un indicador de cómo tienden a estar agrupados los datos respecto a la media.

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \text{Media}(X))^2}{N - 1}}$$

### 2.3.2 Test de Wilcoxon Rank Sum

El test de Wilcoxon Rank Sum es una prueba no paramétrica para dos poblaciones cuando las muestras son independientes. Si X e Y son muestras independientes con diferentes tamaños de la muestra, la prueba estadística que se obtiene es la suma de rangos de la primera muestra.

Es equivalente al test U de Mann-Whitney. La prueba U de Mann-Whitney es una prueba no paramétrica para la igualdad de medianas poblacionales de dos muestras independientes X e Y.

En el test U de Mann-Whitney, U, es el número de veces que Y precede a X en una disposición ordenada de los elementos en las dos muestras independientes X e Y. Está relacionado con la suma estadística de rangos de Wilcoxon de la siguiente manera:

Si X es una muestra de tamaño  $n_x$ :

$$U = W - \frac{n_x(n_x + 1)}{2}$$

Para muestras grandes, el test de Wilcoxon Rank Sum utiliza una z-estadística para calcular p-valor.

Si X e Y son dos muestras independientes de tamaño  $n_x$  y  $n_y$ , donde  $n_x < n_y$ , la z-estadística es:

$$z = \frac{W - E(W)}{\sqrt{V(W)}} = \frac{W - \left[ \frac{n_x n_y + n_x(n_x + 1)}{2} \right] - 0,5 \cdot \text{sing}(W - E(W))}{\sqrt{\frac{n_x n_y (n_x + n_y + 1) - \text{tiescor}}{12}}}$$

Dónde tiescor viene dada por:

$$\text{tiescor} = \frac{2 \cdot \text{tieadj}}{(n_x + n_y)(n_x + n_y - 1)}$$

## 3. RESULTADOS

### 3.1 Condiciones climáticas recientes

En esta primera sección se llevará a cabo una evaluación de los datos de viento obtenidos de las simulaciones de EURO-CORDEX mediante el RCM RCA4 forzado por los tres GCM mencionados en el capítulo 2. Para ello se compararán estas simulaciones con la simulación obtenida por el mismo modelo regional forzado con los datos del reanálisis ERA-Interim. El análisis se realizará en términos anuales y estacionales. Se han considerado 4 estaciones: invierno (enero, febrero, marzo), primavera (abril, mayo, junio), verano (julio, agosto, septiembre) y otoño (octubre, noviembre, diciembre).

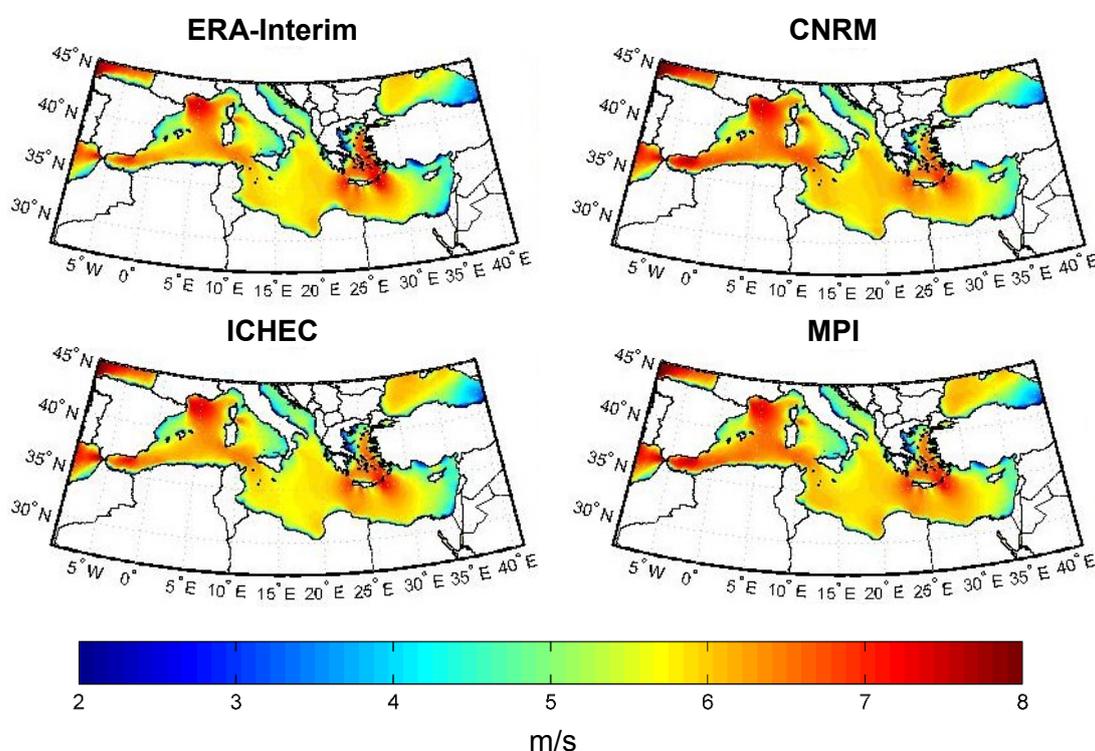


Figura 3.1: Velocidad del viento anual (m/s) para RCA4-ERA-Interim, RCA4-CNRM, RCA4-ICHEC y RCA4-MPI (1980-2005).

En la Figura 3.1 se muestra la velocidad anual del viento (m/s) para el periodo 1980-2005. En la primera imagen obtenida a partir de los datos de ERA-Interim se puede observar que, sobre el mar Mediterráneo, las áreas del mar de Alborán, el golfo de León y el mar Egeo, son las zonas en las que el viento alcanza mayor velocidad (7-8 m/s). Las zonas con menor velocidad de viento (4-5 m/s) son la costa de la Península Ibérica en las zonas de la Comunidad Valenciana y Cataluña, la mayor parte de la costa italiana, el mar Adriático y la parte sureste de la cuenca (Siria, Líbano, Turquía...).

La distribución espacial de la velocidad del viento calculada a partir de los diferentes GCM es similar. Se observan los valores más altos de velocidad del viento en el mar Egeo, el golfo de León y el mar de Alborán con valores alrededor de 8 m/s. La parte más occidental del mar Negro también presenta altos valores de velocidad del viento para todas las simulaciones con valores alrededor de 6 m/s.

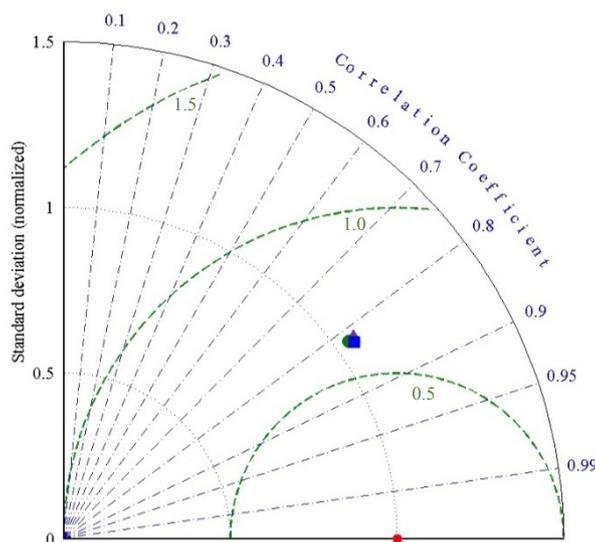


Figura 3.2: Diagrama de Taylor para la velocidad anual del viento. (RCA4-ERA-interim rojo, RCA4-CNRM morado, RCA4-ICHEC verde, RCA4-MPI azul).

La velocidad del viento también se ha analizado mediante diagramas de Taylor para comprobar las diferencias de forma estadística, Figura 3.2. Las tres simulaciones muestran patrones comparables entre ellas ya que los puntos están todos próximos. Los valores de la correlación son muy altos (0,8) y los valores de RMS bajos. Además, los tres puntos se sitúan muy cerca de la línea de desviación estándar que marca los datos de ERA-Interim lo que indica que estas simulaciones reproducen de forma correcta estos datos.

En la Figura 3.3 se muestra la velocidad del viento para la época invernal (enero, febrero, marzo). Para los resultados obtenidos con ERA-Interim se observa una velocidad del viento alta en prácticamente toda la cuenca del Mediterráneo, destacando la zona del golfo de León en la que el viento alcanza los 8 m/s. En la parte sureste de la cuenca (Siria, Líbano...) y la parte este del mar Negro la velocidad es más baja (5-6 m/s).

Igual que en el caso anterior, las simulaciones obtenidas con los diferentes modelos globales también muestran patrones muy similares al obtenido con ERA-Interim en los que valores de velocidad del viento mayores de 6 m/s abarcan casi toda la superficie del mar Mediterráneo.

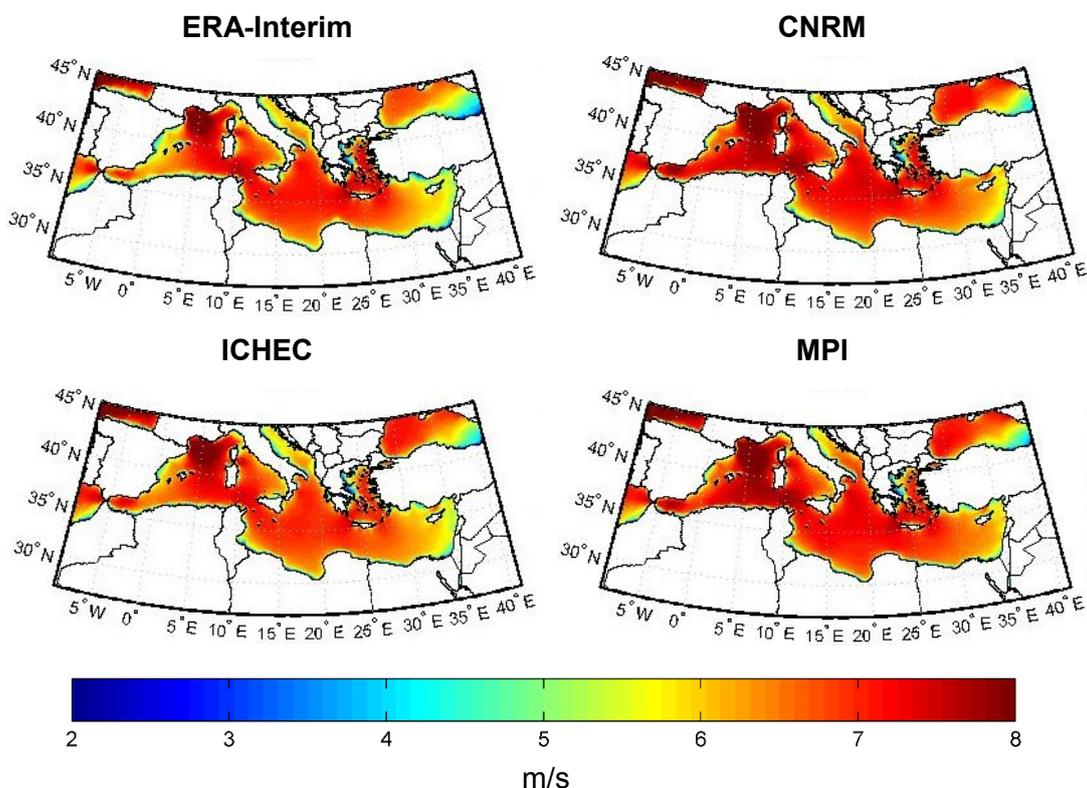


Figura 3.3: Velocidad del viento invernal (m/s) para RCA4-ERA-Interim, RCA4-CNRM, RCA4-ICHEC y RCA4-MPI (1980-2005).

En el diagrama de Taylor correspondiente a los valores de velocidad del viento para el invierno (Figura 3.4) se puede comprobar que las tres simulaciones se aproximan a los datos obtenidos con ERA-Interim. El valor del coeficiente de correlación está en torno a 0,8 indicando una evolución temporal adecuada. Los valores de RMS están próximos a 0,5 y los tres puntos se sitúan cerca de la línea que marca los datos de ERA-Interim.

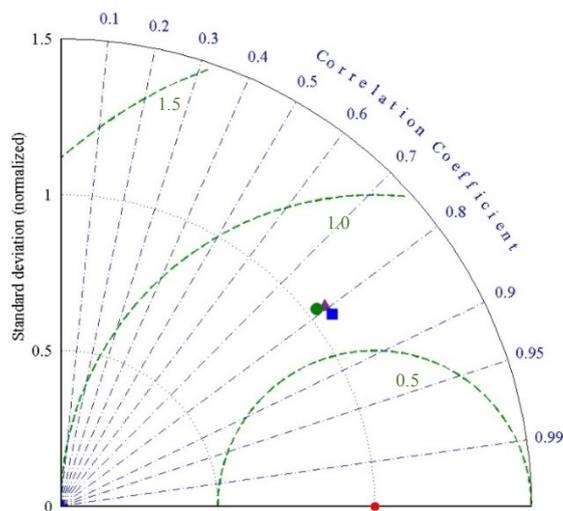


Figura 3.4: Diagrama de Taylor para la velocidad invernal del viento. (RCA4-ERA-interim rojo, RCA4-CNRM morado, RCA4-ICHEC verde, RCA4-MPI azul).

En la Figura 3.5 se muestra la velocidad del viento para la primavera (abril, mayo, junio). Para la simulación obtenida a partir de ERA-Interim se observa que las zonas con mayor velocidad del viento (6-7 m/s) son: el mar de Alborán, el golfo de León, el mar Tirreno en la zona al sur de Cerdeña y el mar Egeo en determinadas zonas cercanas a la isla de Creta. En el resto de la cuenca, el viento varía entre 4-6 m/s.

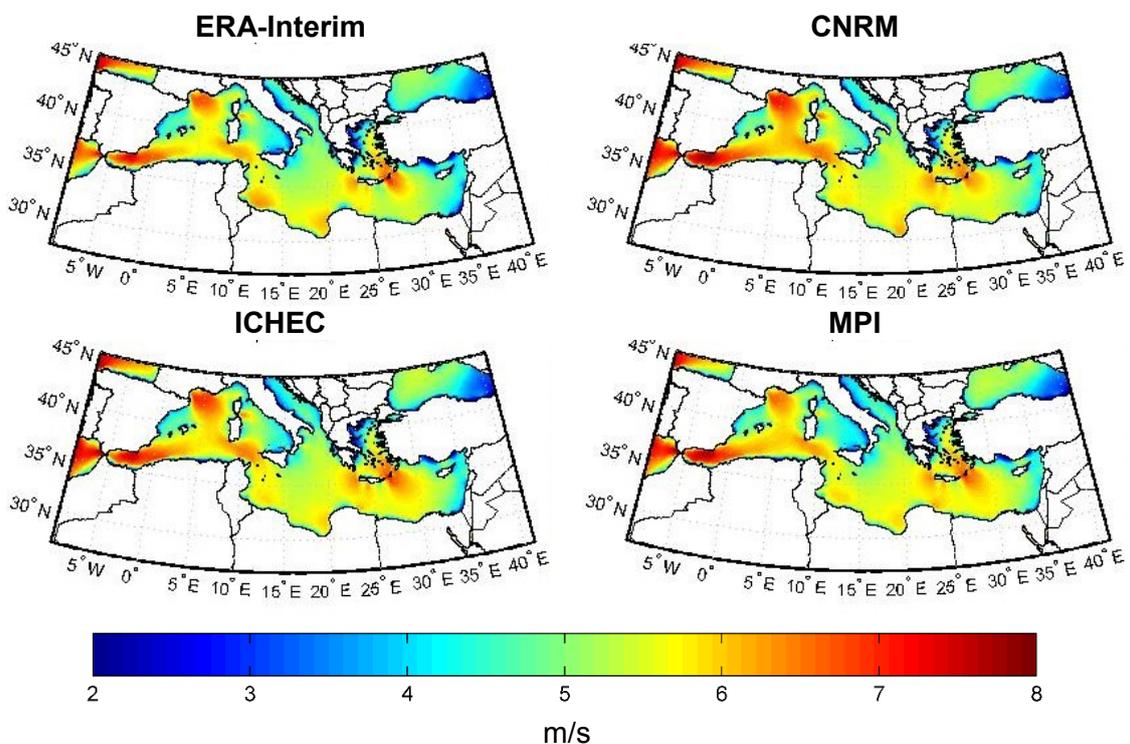


Figura 3.5: Velocidad del viento (m/s) en primavera para RCA4-ERA-Interim, RCA4-CNRM, RCA4-ICHEC y RCA4-MPI (1980-2005).

La velocidad del viento obtenida a partir de las otras tres simulaciones también muestra un patrón similar con los valores máximos de velocidad en el mar de Alborán y el golfo de León. Al igual que en para los resultados de ERA-Interim, la zona este de la cuenca, la costa Italiana, la de Grecia y Turquía, muestran una velocidad del viento más baja (5 m/s).

En la Figura 3.6 se muestra el diagrama de Taylor correspondiente a la velocidad del viento en primavera. Al igual que en la estación anterior, la correlación entre los resultados de las tres simulaciones forzadas con los diferentes GCM y la simulación forzada con ERA-Interim muestra valores del orden de 0,8. Los valores de RMS están un poco por encima de 0,5 y su desviación estándar es próxima a 1.

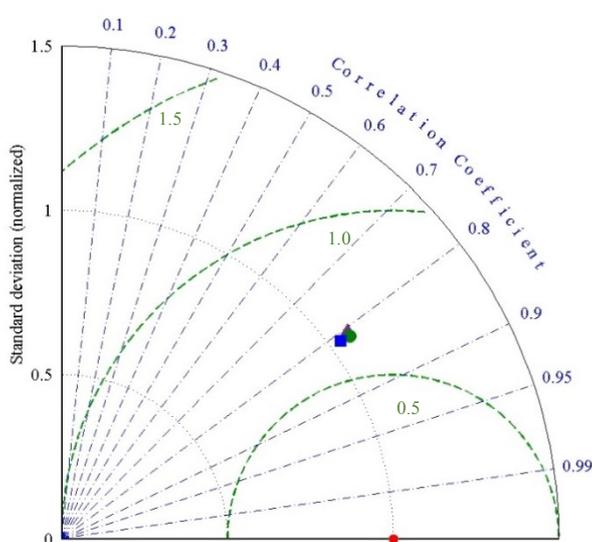


Figura 3.6: Diagrama de Taylor para la velocidad del viento en primavera. (RCA4-ERA-interim rojo, RCA4-CNRM morado, RCA4-ICHEC verde, RCA4-MPI azul).

En la Figura 3.7 se muestra la velocidad del viento para el verano (julio, agosto, septiembre). El patrón es similar al obtenido para la primavera aunque se pueden observar algunas diferencias. En este caso, para los resultados correspondientes a la simulación de ERA-Interim la cuenca se caracteriza por una velocidad del viento baja (3-5 m/s) a excepción del mar Egeo donde se observan valores máximos de 8 m/s. También se pueden observar valores altos localizados en el mar de Alborán, golfo de León y el golfo de Sirte donde se alcanza los 6-7 m/s.

Si se comparan las otras tres simulaciones, se observa un comportamiento del viento similar con los valores más elevados de la velocidad de viento en las mismas regiones.

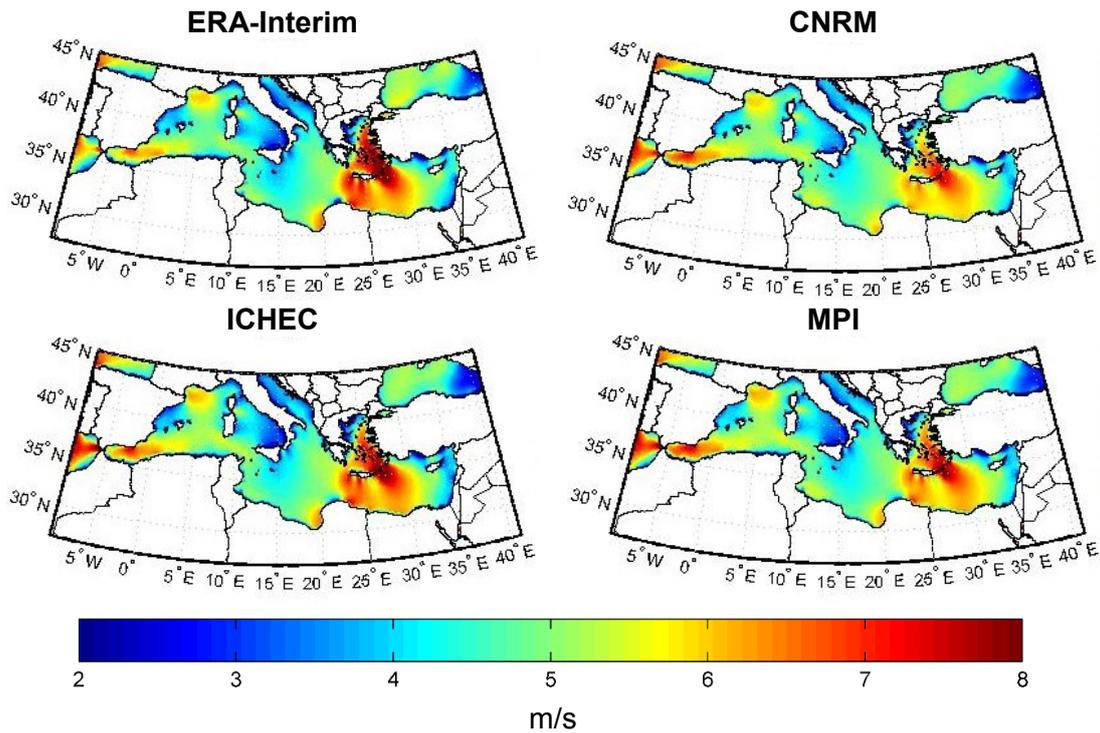


Figura 3.7: Velocidad del viento (m/s) en verano para RCA4-ERA-Interim, RCA4-CNRM, RCA4-ICHEC y RCA4-MPI (1980-2005).

En el siguiente diagrama de Taylor (Figura 3.8) se puede comprobar que en verano el coeficiente de correlación es ligeramente mayor que en las estaciones anteriores con valores en torno a 0,85 para las tres simulaciones. El valor de RMS para cada simulación también es menor que el de las estaciones analizadas hasta el momento y la desviación estándar está muy próxima a la línea que señala los datos de ERA-Interim.

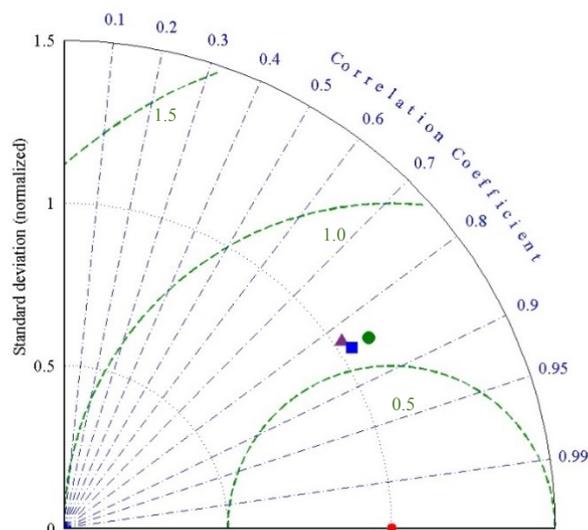


Figura 3.8: Diagrama de Taylor para la velocidad del viento en verano. (RCA4-ERA-interim rojo, RCA4-CNRM morado, RCA4-ICHEC verde, RCA4-MPI azul).

La velocidad del viento para el otoño (octubre, noviembre, diciembre) se puede observar en la Figura 3.9. En este caso el patrón es similar al observado en la época invernal. En todas las simulaciones se observan velocidades del viento elevadas (mayores que 6 m/s) en la mayor parte de la cuenca. Destaca el golfo de León por ser la zona con valores más altos (7-8 m/s). Los valores más bajos de la velocidad al este de la cuenca también son comunes en todas las simulaciones.

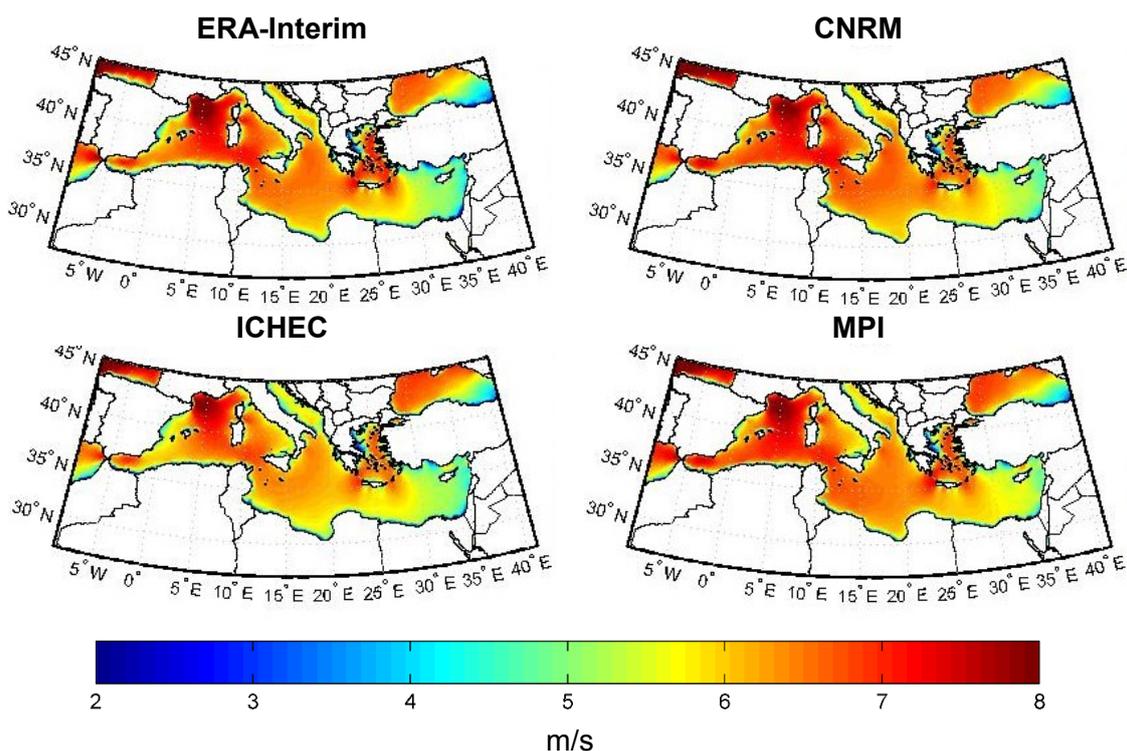


Figura 3.9: Velocidad del viento (m/s) en otoño para RCA4-ERA-Interim, RCA4-CNRM, RCA4-ICHEC y RCA4-MPI (1980-2005).

En el diagrama de Taylor correspondiente a la estación de otoño (Figura 3.10) se puede comprobar que las tres simulaciones forzadas con los modelos globales muestran coeficientes de correlación del orden de 0,8 en relación a los resultados obtenidos con ERA-Interim. Los valores de RMS están muy próximos a 0,5 y los tres puntos caen prácticamente en la línea de desviación estándar correspondiente a los resultados de ERA-Interim indicando que las simulaciones se ajustan bastante bien a los datos considerados como observaciones.

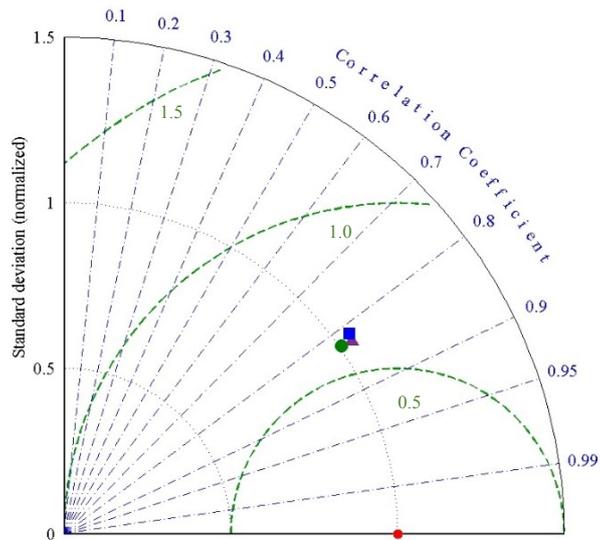


Figura 3.10: Diagrama de Taylor para la velocidad del viento en otoño. (RCA4-ERA-interim rojo, RCA4-CNRM morado, RCA4-ICHEC verde, RCA4-MPI azul).

Tanto en las imágenes anuales como estacionales, las zonas del mar de Alborán, el golfo de León y el mar Egeo, se presentan como las áreas con mayor velocidad de viento y la zona este de la cuenca como el área con menor velocidad.

En general, si se comparan los resultados estacionales, se observa que el invierno es la época del año en la que el viento alcanza las velocidades más elevadas (6-8 m/s) en prácticamente toda la zona; mientras que en verano predominan velocidades más bajas (4-5 m/s) a lo largo de la cuenca.

### 3.2 Proyecciones climáticas

En esta segunda sección se analizarán las proyecciones futuras para la velocidad del viento y la potencia eólica en la cuenca del Mediterráneo. Para ello se analizarán las diferencias entre el periodo 2021-2060 y 1971-2005, bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. Al igual que en la sección anterior el estudio se realizará considerando medias anuales y estacionales. En primer lugar se analizarán las diferencias en la velocidad del viento (m/s) y en segundo lugar las diferencias en la potencia ( $W/m^2$ ).

Las zonas del área de estudio marcadas con puntos grises en las figuras indicarán que las diferencias en los cambios observados tanto de velocidad como de potencia son significativas de acuerdo al test de Wilcoxon Rank Sum.

### 3.2.1 Cambios en la velocidad de viento

En la Figura 3.11 se pueden observar los cambios esperados para el periodo 2021-2060 en la velocidad del viento anual con respecto al periodo 1971-2005 para las tres simulaciones en los dos escenarios considerados RCP4.5 y RCP8.5. Ambos escenarios muestran cambios inferiores a 0,2 m/s (en valor absoluto).

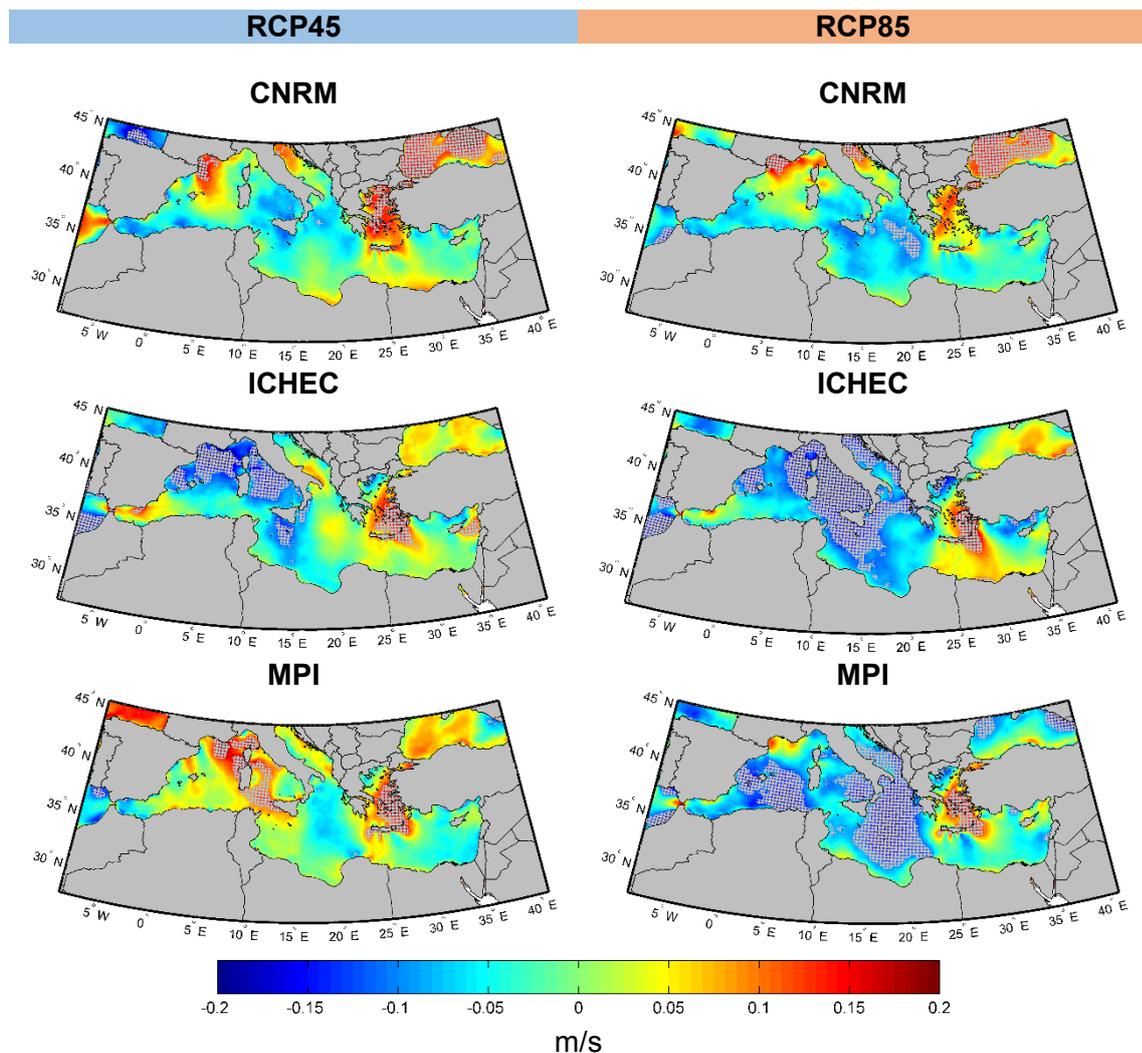


Figura 3.11: Diferencia de la velocidad del viento entre el periodo 2021-2060 y 1971-2005 considerando medias anuales para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. Las zonas marcadas con puntos grises indican las diferencias significativas al nivel del 5%.

Para el escenario RCP 4.5 (columna de la izquierda), se pueden observar diferentes comportamientos entre las tres simulaciones:

- En el caso de la simulación correspondiente a CNRM, se obtiene un aumento de la velocidad del viento sobre el mar Egeo, El golfo de León y el golfo de Venecia con valores significativos en torno a 0,1-0,2 m/s. También se pueden encontrar valores positivos en la mayor parte del

mar Negro, significativos en casi toda el área. Por otro lado, en el mar de Alborán, el mar Tirreno y el mar Jónico se produce una disminución de la velocidad del viento (-0,1 m/s) que no llega a ser significativa.

- Para la simulación forzada con ICHEC, también se observa un aumento significativo de la velocidad sobre el mar Egeo (0,1 m/s). En cabo de Gata, el golfo de Manfredonia (sureste de Italia) y al oeste de Siria también se observan valores positivos, siendo significativos en esta última zona. Por el contrario, en el golfo de León, el golfo de Valencia y el mar Tirreno tienen lugar descensos significativos de la velocidad del viento.

- En la tercera simulación con MPI, se repite un aumento significativo en el mar Egeo. También se observan valores positivos significativos en el golfo de León y el mar Tirreno. En las zonas próximas a las Islas Baleares y la costa de Croacia existe un ligero aumento (0,005-0,1 m/s) y en las zonas del mar de Alborán, el mar Jónico y el este de la cuenca se aprecian ligeros descensos (-0,05 m/s). Aunque en ambos casos no llegan a ser significativos.

Para el escenario RCP 8.5 (columna de la derecha) se observan cambios similares en la velocidad del viento con algunas diferencias en magnitud y también en la distribución espacial. De nuevo, se obtienen diferencias positivas sobre el mar Egeo para todas las simulaciones aunque para el caso de CNRM estas diferencias no son significativas.

- Para las simulaciones correspondientes a CNRM e ICHEC se puede ver un comportamiento general muy similar al escenario anterior con diferencias positivas y negativas sobre aproximadamente las mismas zonas, aunque en el caso del escenario RCP 8.5 el descenso en la parte central de la cuenca abarca un área mayor.

- La simulación correspondiente a MPI muestra un resultado diferente para el escenario RCP 8.5. El aumento de la velocidad del viento se mantiene en el mar Egeo (con valores significativos) y en el golfo de León. Sin embargo, se observa un descenso en la parte central de la cuenca, desde la costa oeste de la Península Ibérica hasta el mar Jónico. Esta disminución de la velocidad del viento es significativa en las proximidades de las Islas Baleares, el golfo de Valencia y en el mar Jónico.

Al igual que en la sección anterior, aquí también se realizaron un análisis estacional de los cambios que se pueden producir en la velocidad del viento. La Figura 3.12 muestra las diferencias entre los dos períodos anteriormente indicados para la época invernal (JFM) bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.

Para el escenario RCP 4.5, las tres simulaciones muestran varias zonas donde se produce un aumento de la velocidad del viento, pero con algunas diferencias:

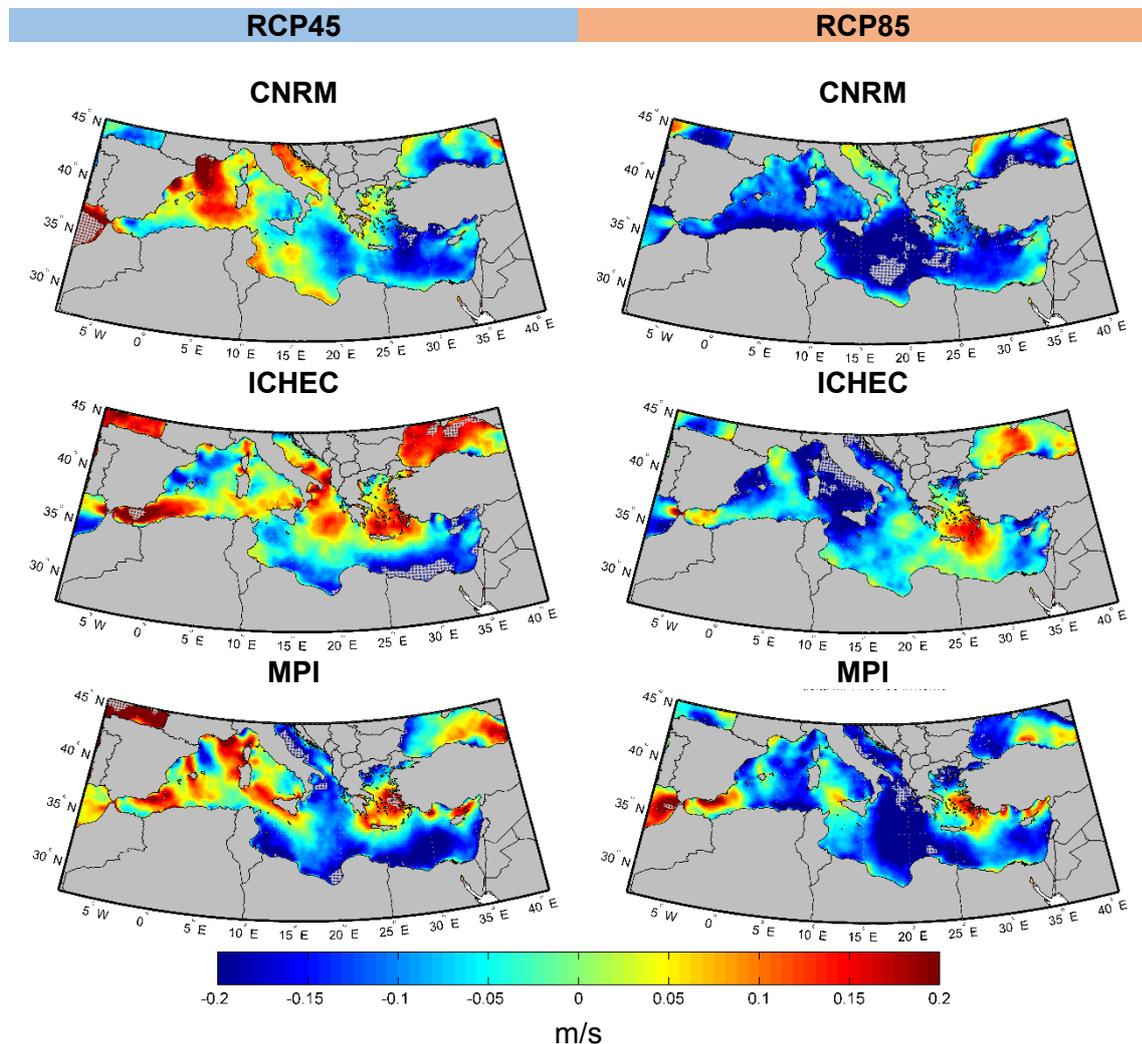


Figura 3.12: Diferencia de la velocidad del viento entre el periodo 2021-2060 y 1971-2005 durante el invierno para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. Las zonas marcadas con puntos grises indican las diferencias significativas al nivel del 5%.

- Para la simulación correspondiente a CNRM, se observan diferencias positivas generalizadas en parte occidental de la cuenca con valores máximos (0,2 m/s) en el golfo de Valencia y el golfo de León. También se obtienen valores positivos en todo el mar Adriático. Por el contrario, la parte oriental de la cuenca muestra una disminución general de la velocidad del viento.
- En el caso de ICHEC, las diferencias más positivas (0,2 m/s) se encuentran en el mar de Alborán, con una pequeña zona donde estas diferencias se pueden considerar significativas. En la parte central de la cuenca también se observan valores positivos en el mar Tirreno (a lo

largo de la costa norte de Sicilia hasta la costa sur de Cerdeña), en la parte sur del mar Adriático y en el mar Jónico. En la parte este, sobre el mar Egeo y el mar Negro también se producen diferencias positivas. Los descensos más importantes tienen lugar en el golfo de Valencia y en la parte sureste de la cuenca, con un descenso significativo en la costa de Egipto.

- Para el modelo MPI también se observa un aumento general de la velocidad en la zona occidental de la cuenca con valores máximos (0,15 m/s) en el mar de Alborán, en torno a las Islas Baleares y al oeste de Córcega, Cerdeña y Sicilia. Sobre el mar Egeo y la parte este del mar Negro también se aprecian valores positivos mientras en el mar Adriático, el mar Jónico y toda la parte sureste de la cuenca muestra un descenso de la velocidad.

En el escenario RCP 8.5, se puede observar que, al contrario que en el anterior escenario, las tres simulaciones muestran descensos generalizados de la velocidad del viento en la mayor parte de la cuenca, aunque también se pueden observar algunas diferencias en la distribución espacial. No obstante estos cambios no son considerados significativos en la mayoría de las áreas:

- Para la simulación del modelo CNRM, la mayor parte de la cuenca se caracteriza por un acusado descenso de -0,2 m/s que llega a ser significativo cerca de la costa de Libia. En el mar Adriático y al este de la cuenca es donde se producen los menores descensos (-0,05 m/s).

- Para el modelo ICHEC, al igual que en el caso anterior, el descenso en la velocidad predomina en la mayor parte de la cuenca. Este descenso es mayor (-0,2 m/s) en el golfo de Valencia, el mar Tirreno (donde llega a ser significativo junto la costa italiana) y parte del mar Adriático (significativo en el golfo de Venecia). En este caso si se pueden destacar algunas zonas con aumentos significativos en la velocidad del viento (0,1-0,15 m/s) como el mar de Alborán, el mar Egeo y la parte oeste del mar Negro.

- En el caso de MPI, también se observa un descenso en la mayor parte de la cuenca con los valores más importantes (-0,2 m/s) en la parte central. Al igual que en la anterior simulación también se encuentran zonas donde se produce un aumento de la velocidad como el mar de Alborán y la costa suroeste de Turquía con valores en torno a 0,15 m/s.

Como se ha mencionado anteriormente, si se comparan las simulaciones para cada escenario se pueden observar comportamientos muy distintos. Quizás la particularidad más importante es que el escenario RCP 8.5 tiende a producir descensos en la velocidad del viento a lo largo de la mayor parte de la cuenca con las disminuciones más importantes en la parte central. Por

otra parte, en el escenario RCP 4.5 se observa un gran número de zonas donde se predicen aumentos en la velocidad del viento. No obstante, la significatividad de estos cambios es bastante reducida.

En la Figura 3.13 se representan las diferencias entre los dos períodos anteriormente indicados para la primavera, considerando también ambos escenarios. Observando todas las simulaciones se puede comprobar que, en general, ambos escenarios predicen un aumento significativo de la velocidad del viento en numerosas zonas de la cuenca. Sin embargo, existen importantes diferencias.

Para el escenario RCP 4.5, se aprecian algunos patrones comunes a las tres simulaciones, aunque también se observa alguna diferencia:

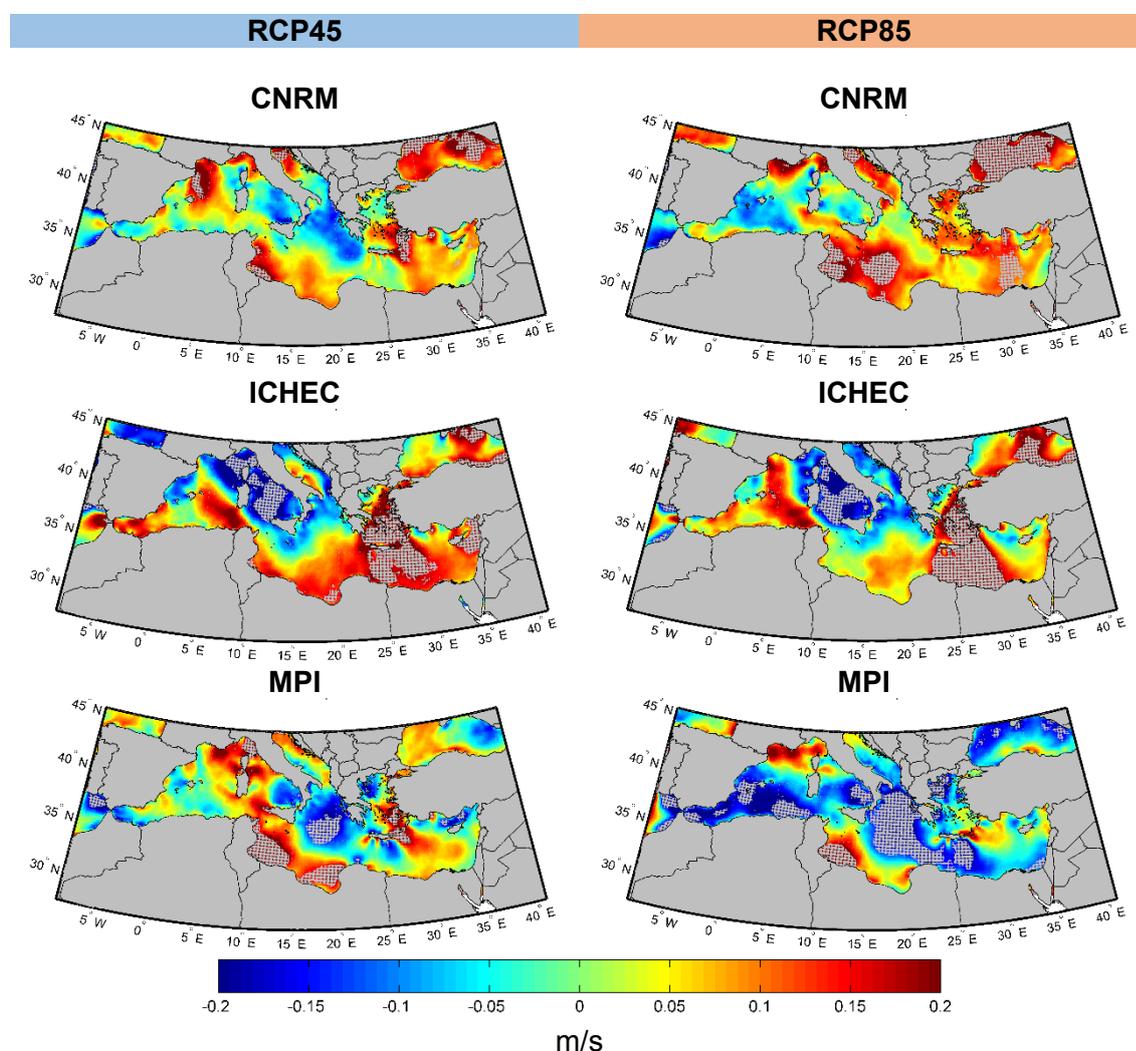


Figura 3.13: Diferencia de la velocidad del viento entre el periodo 2021-2060 y 1971-2005 durante la primavera para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. Las zonas marcadas con puntos grises indican las diferencias significativas al nivel del 5%.

- Para la primera simulación (CNRM), la mayor parte de la cuenca muestra un aumento de la velocidad con valores significativos (0,2 m/s) cerca del golfo de León, en el golfo de Venecia, la costa de Túnez, una pequeña zona del mar Egeo y la parte norte del mar Negro. Los descensos más relevantes (-0,15 m/s) tienen lugar en el mar Jónico y en el mar Tirreno al norte de Sicilia, aunque no llegan a ser significativos.

- En la simulación correspondiente a ICHEC, se observan descensos principalmente en la parte central de la cuenca, alcanzando un valor significativo en el mar Tirreno y al norte de la isla de Córcega (-0,2 m/s). En el resto de la cuenca se producen importantes aumentos, que en el caso del mar Egeo y la costa de Siria, llegan a mostrar una diferencia significativa.

- Para el modelo MPI el patrón es un poco diferente. En la franja desde el norte de Córcega hasta la costa de Túnez y Libia se observan diferencias positivas, significativas en las dos últimas zonas, con valores máximos de 0,2 m/s. En el mar Adriático, el mar Egeo y la parte oeste del mar Negro también se producen valores positivos. Por otro lado, se observan descensos en el mar de Alborán, el mar Jónico, (que presenta un descenso significativo), y pequeñas zonas en el mar Tirreno y al sur de Turquía.

En el escenario RCP 8.5, existen diferencias más notables entre las tres simulaciones y también en relación al escenario RCP 4.5:

- Para la simulación con CNRM, se puede observar que en la zona más occidental de la cuenca se producen descensos de entre -0,05 y -0,1 m/s, excepto en el golfo de León, donde existe un aumento significativo de 0,2 m/s. Por el contrario, en el resto de la cuenca se producen aumentos en la velocidad del viento, que llegan a ser significativos en las costas de Túnez y Libia, en el Golfo de Venecia y el este de la cuenca.

- Para el modelo ICHEC, el patrón es muy similar al observado en el escenario RCP 4.5 con una disminución de la velocidad del viento (-0,2 m/s) en la parte central de la cuenca con valores significativos en el mar Tirreno. En el resto de la cuenca se produce principalmente un aumento en la velocidad, con valores significativos sobre el mar Egeo hacia el sur, hasta la costa de Libia y Egipto.

- En la última simulación (MPI) se observa un descenso bastante generalizado que alcanza valores significativos de -0,2 m/s en el mar de Alborán, al sur de las Islas Baleares, una pequeña parte del mar Tirreno y el mar Jónico. Los aumentos más destacables (0,2 m/s) tienen lugar en el golfo de León, la costa de Túnez y al este de la isla de Creta.

Comparando las simulaciones realizadas con el mismo modelo en los distintos escenarios, se puede comprobar que las mayores diferencias se obtienen para los modelos CNRM y MPI. En el primer caso las diferencias se deben a la distribución espacial de las zonas donde la velocidad disminuye, que para el escenario RCP 4.5 se concentran principalmente en la parte central mientras que en el caso del RCP 8.5 los descensos se observan en la parte occidental. Por otro lado, para las simulaciones forzadas con MPI las diferencias se deben a que en el escenario RCP 8.5 se observan descensos en la mayor parte de la cuenca.

En la Figura 3.14 se pueden observar los resultados obtenidos durante el verano bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.

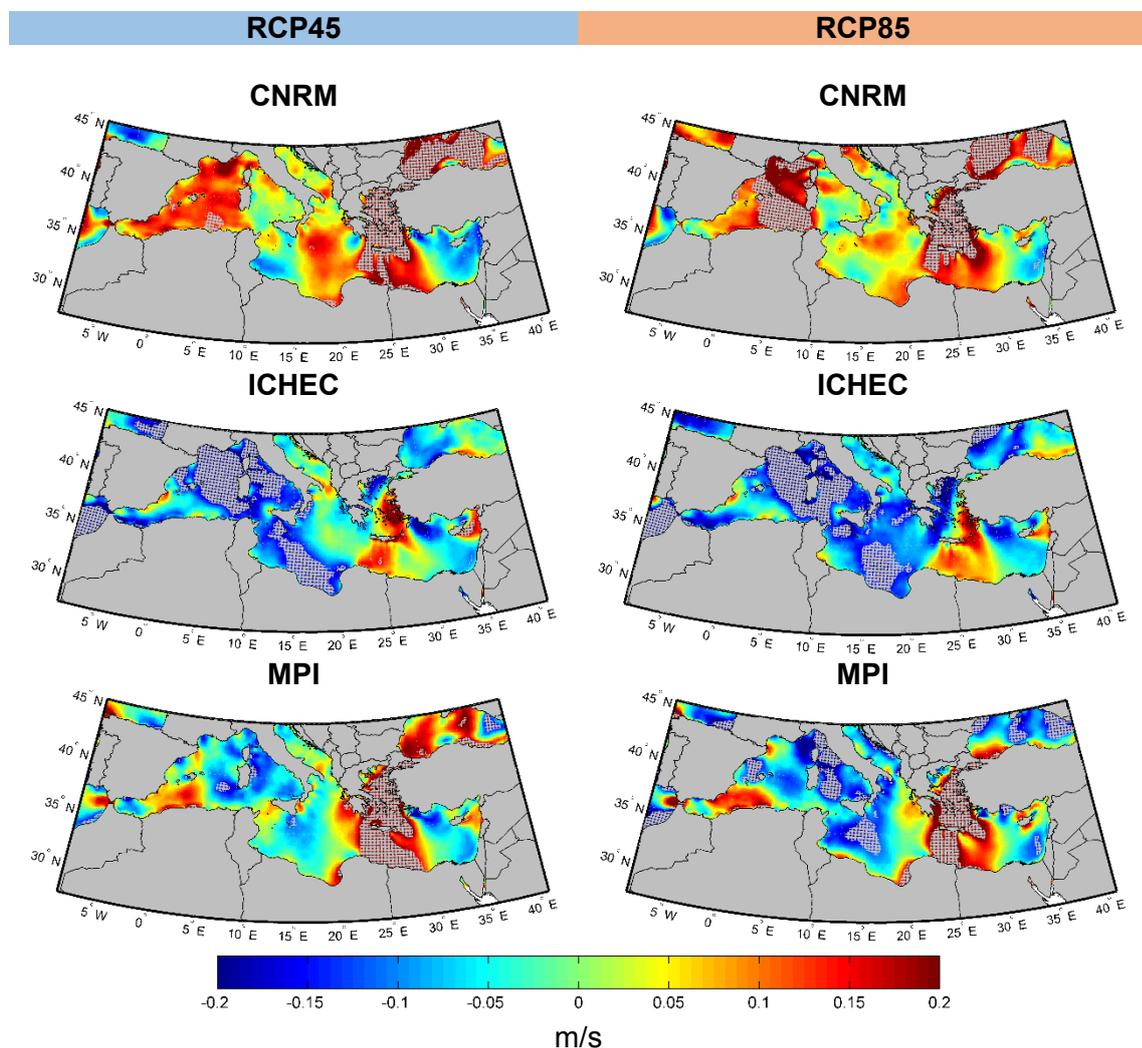


Figura 3.14: Diferencia de la velocidad del viento entre el periodo 2021-2060 y 1971-2005 durante el verano para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. Las zonas marcadas con puntos grises indican las diferencias significativas al nivel del 5%.

Observando las imágenes pertenecientes al escenario RCP 4.5, se aprecian importantes diferencias entre las distintas simulaciones:

- Para el modelo CNRM, se observa un aumento de la velocidad en prácticamente toda la cuenca excepto en la costa entre Túnez y Libia y en la parte más oriental de la cuenca (mar Levantino). Estos aumentos tienen su máximo valor (0,2 m/s) al este del golfo de León, en el mar Egeo y en el mar Negro, con diferencias significativas en las dos últimas zonas.

- En el caso de ICHEC, predomina un descenso de la velocidad en la mayor parte de la cuenca. Los mayores descensos se producen en el golfo de León, el mar Tirreno y el mar de Libia, donde el viento sufre un descenso significativo de -0,2 m/s. El aumento más destacable es el que se produce en el mar Egeo que alcanza un valor en torno a 0,2 m/s y en la costa de Siria, donde se produce un aumento significativo.

- Para la simulación con MPI, los descensos más importantes (-0,2 m/s) se observan en la parte central de la cuenca alrededor de las islas de Córcega, Cerdeña y Sicilia. Por otro lado, el aumento significativo (0,2 m/s) más importante ocurre sobre el mar Egeo y se extiende hasta la costa de Libia y Egipto. Al sur de las Islas Baleares y en la zona occidental del mar Negro también se observan valores positivos aunque no significativos.

Para el escenario RCP 8.5, las tres simulaciones manifiestan un comportamiento muy similar al anterior escenario:

- Para la simulación correspondiente a CNRM, los valores positivos y negativos muestran una distribución espacial similar al escenario RCP 4.5 con descensos de la velocidad en la costa entre Túnez y Libia y en el mar Levantino. En el resto de la cuenca se obtienen valores positivos de la diferencia, aunque en este caso también son significativos en gran parte de la cuenca occidental.

- Para el modelo ICHEC, al igual que en el anterior escenario, existe un descenso en la velocidad del viento en la mayor parte de la cuenca a excepción del mar Egeo donde se obtienen valores positivos. Los descensos son significativos en ambos casos y se centran en las mismas zonas (golfo de León, mar Tirreno y mar de Libia).

- En la última simulación (MPI), también se observa casi el mismo comportamiento descrito en el escenario RCP 4.5 con descensos en parte central de la cuenca y aumentos al sur de las Islas Baleares y en el mar Egeo. La principal diferencia se encuentra en que en el escenario RCP 8.5 los descensos que se observan en la zona central son mayores y en este

caso significativos. Además, el mar Negro en este caso, muestra descensos significativos en gran parte de su cuenca.

La Figura 3.15 muestra las diferencias calculadas para el otoño para ambos escenarios.

Para el escenario RCP 4.5, las simulaciones forzadas con CNRM e ICHEC muestran resultados similares entre sí, mientras que la correspondiente a MPI tiene un comportamiento totalmente diferente:

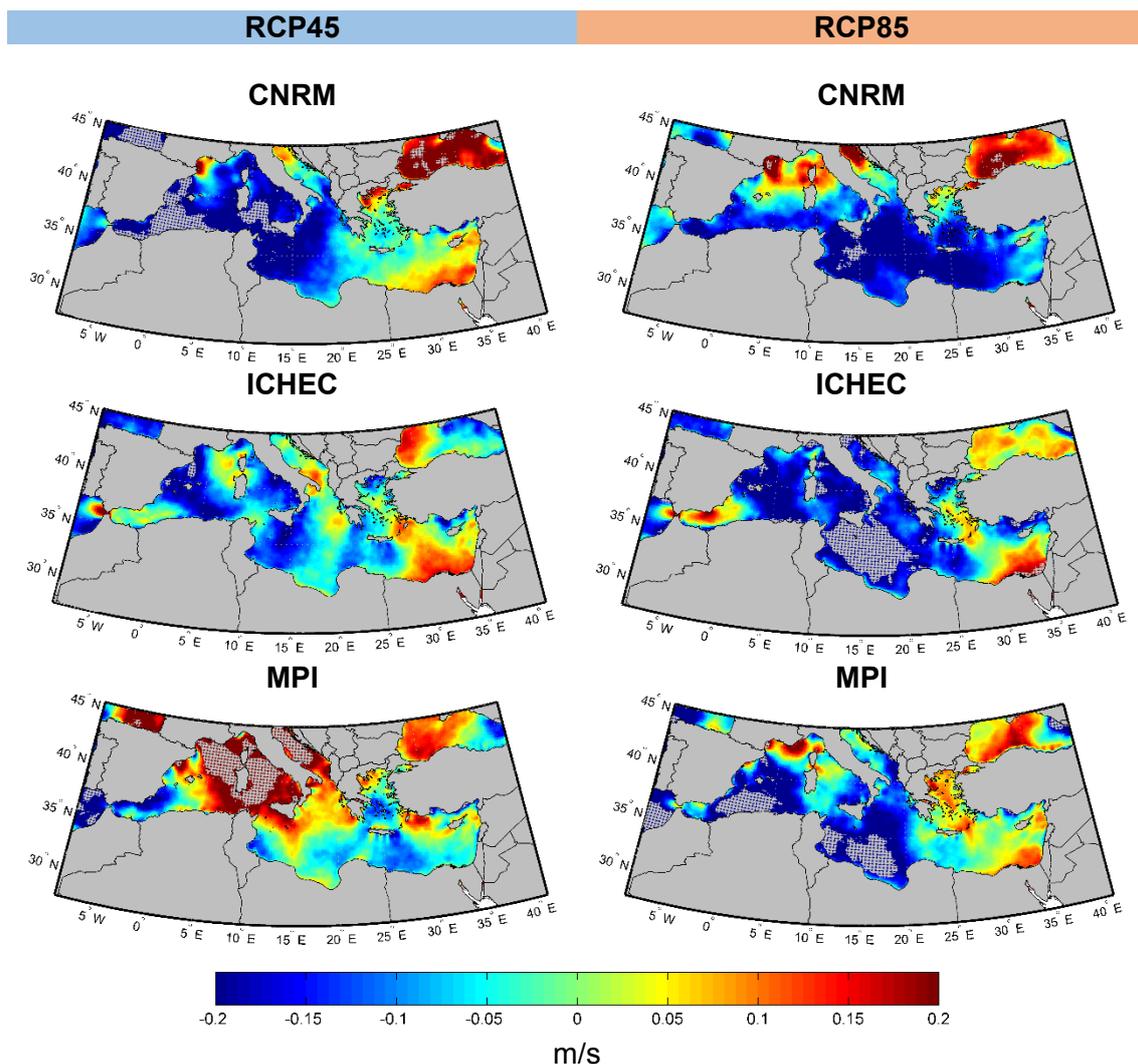


Figura 3.15: Diferencia de la velocidad del viento entre el periodo 2021-2060 y 1971-2005 durante el otoño para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. Las zonas marcadas con puntos grises indican las diferencias significativas al nivel del 5%.

- En el caso de CNRM, en la parte central y occidental de la cuenca predominan los descensos en la velocidad del viento (-0,2 m/s) que llegan a ser significativos a lo largo de la costa de Algeria y entre las Islas de Sicilia y Cerdeña. En esta zona también se observan dos pequeñas

regiones con valores positivos localizadas en el golfo de León (0,2 m/s) y el golfo de Venecia (0,1 m/s). En el resto de la cuenca los descensos son ligeros y se producen aumentos, apenas significativos, en el mar Negro, al Norte del mar Egeo y al sur de la cuenca, en la costa de Egipto.

- Para la simulación con ICHEC, en la mayor parte de la cuenca se observan descensos, aunque los de mayor valor (-0,2 m/s) tienen lugar en el golfo de Valencia, el golfo de León, parte del mar Tirreno y al sur de Sicilia. El aumento más destacable (0,1-0,15 m/s) ocurre en la zona este de la cuenca y la parte más occidental del mar Negro. Sin embargo, estos cambios apenas son significativos.

- En la simulación correspondiente a MPI, el patrón que se observa es muy diferente al de las dos simulaciones anteriores. En este caso existe un aumento significativo que ocurre en prácticamente toda la zona central de la cuenca de 0,2 m/s. También se observan valores positivos en la zona oeste del mar Negro y al sur de Turquía. El descenso más importante (-0,2 m/s) tiene lugar en el mar de Alborán y se extiende hacia el golfo de Valencia, pero no es significativo.

En el escenario RCP 8.5, los resultados muestran un comportamiento análogo para las tres simulaciones con grandes similitudes a los patrones descritos en el escenario anterior, a excepción del modelo MPI:

- Para la simulación con CNRM bajo este escenario, también se observan descensos en la mayor parte de la cuenca aunque su distribución espacial es diferente. En este caso los valores negativos, que llegan a los -0,2 m/s, se extienden en una franja horizontal en la parte sur de toda la cuenca. Igual que en el escenario anterior los aumentos más destacables (0,2 m/s) tienen lugar en el mar Negro, el golfo de León y el golfo de Venecia. En este caso también se observan valores cambios positivos de la Isla de Córcega. Como ocurría en el escenario RCP4.5 estos cambios apenas son significativos.

- Para el modelo ICHEC, como en el escenario anterior, se aprecian descensos de -0,2 m/s en la mayor parte de la cuenca, aunque en este caso se obtienen valores significativos al sur de Sicilia. Los valores positivos observados en el anterior escenario en parte del mar Negro y en la costa de Egipto también se mantienen en este caso, aunque también existe un claro aumento de la velocidad en el mar de Alborán (0,15-0,2 m/s) que no llega a ser significativo.

- En la simulación correspondiente a MPI, los descensos más importantes (-0,2 m/s) ocupan la mayor parte de las zonas oeste y central de la cuenca, con valores significativos al sur de las Islas Baleares y en la costa de Túnez y Libia. Al este del golfo de León se aprecia un fuerte

aumento de 0,2 m/s. Al este de la cuenca, así como sobre el mar Egeo y parte del mar Negro, también se observan valores positivos de la diferencia cercanos a 0,1 m/s.

Comparando las simulaciones realizadas con el mismo modelo en los distintos escenarios, se puede comprobar que las mayores diferencias se obtienen para los modelos CNRM y MPI. En el primer caso las diferencias se deben a la distribución espacial de las zonas donde la velocidad disminuye, que para el escenario RCP 4.5 se concentran principalmente en la parte central mientras que en el caso del RCP 8.5 los descensos se observan en la parte oriental. Por otro lado, para las simulaciones forzadas con MPI las diferencias se deben a que en el escenario RCP 8.5 se observan descensos en la mayor parte de la cuenca.

Si se comparan las simulaciones de ambos escenarios forzadas con el mismo modelo, se puede observar que los resultados de MPI muestran un comportamiento muy diferente según el escenario considerado. En el escenario RCP 4.5 se obtiene un fuerte aumento de la velocidad del viento en la zona oeste y central de la cuenca, mientras que para el escenario RCP 8.5 en esas zonas se observan descensos importantes.

Como se ha observado en las imágenes anteriores, existen varias diferencias entre las simulaciones bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. Por lo general, el escenario RCP 4.5 muestra un mayor número de áreas con aumentos en la velocidad del viento que el escenario RCP 8.5. En el caso de los descensos, éstos suelen ser de menor magnitud en el escenario RCP 4.5.

Observando los períodos estacionales, se puede decir que en otoño e invierno se producen descensos de la velocidad del viento en la mayor parte de la cuenca aunque en pocas zonas son significativos estos cambios, sobre todo en invierno. En primavera y verano predominan las zonas con cambios significativos que en su mayoría muestran aumentos en la velocidad del viento para el periodo 2021-2060.

### **3.2.2 Cambios en la potencia eólica**

En esta sección se analizarán los cambios en la potencia eólica teniendo en cuenta también la diferencia entre los períodos 1971-2005 y 2021-2060 para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.

La Figura 3.16 muestra las diferencias de la potencia eólica entre estos dos períodos considerando medias anuales. Ambos escenarios muestran cambios menores que 50 W/m<sup>2</sup> (en valor absoluto). Como es de esperar, las diferencias más importantes se observan sobre

las mismas zonas del dominio que se han descrito para la velocidad del viento en ambos escenarios (Figura 3.12).

Para el escenario RCP 4.5 (columna de la izquierda), se puede observar que todas las simulaciones producen diferencias positivas significativas ( $30 \text{ W/m}^2$ ) en el mar Egeo. También se pueden encontrar valores positivos de la diferencia en la mayor parte del mar Negro aunque solo son significativos en la simulación forzada por CNRM ( $30 \text{ W/m}^2$ ).

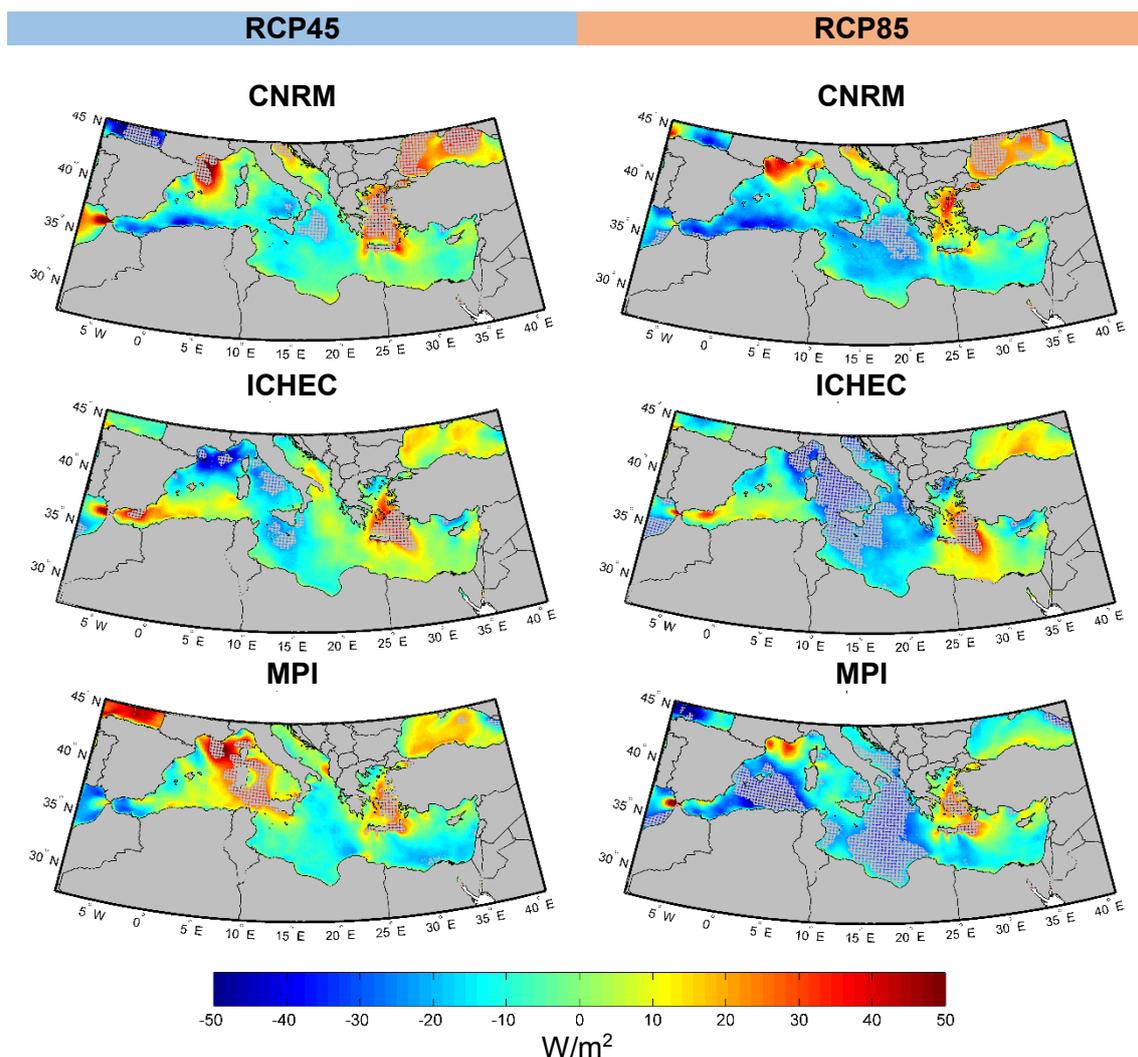


Figura 3.16: Diferencia de potencial eólico entre el periodo 2021-2060 y 1971-2005 considerando medias anuales para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. Las zonas marcadas con puntos grises indican las diferencias significativas al nivel del 5%.

En algunas zonas, como el golfo de León, las diferencias muestran comportamientos opuestos entre las simulaciones. Así, las simulaciones correspondientes a CNRM y MPI indican un aumento significativo en la potencia eólica ( $40\text{-}50 \text{ W/m}^2$ ) mientras que para ICHEC se obtienen valores negativos también significativos. Por otro lado, en el mar de Alborán solo se observan

diferencias positivas para la simulación de ICHEC (30 W/m<sup>2</sup>). En las simulaciones forzadas por ICHEC y MPI también se pueden ver comportamientos opuestos en el mar Tirreno con disminuciones significativas en la potencia eólica para el primer caso y aumentos en el segundo caso.

Para el escenario RCP 8.5 (columna de la derecha) se observan cambios similares a los analizados en el anterior escenario con algunas diferencias en magnitud y también en la distribución espacial. De nuevo, se obtienen diferencias positivas sobre el mar Egeo para todas las simulaciones aunque para el caso de CNRM estas diferencias no son significativas.

Para las simulaciones correspondientes a CNRM e ICHEC se puede ver un comportamiento general muy similar al escenario anterior con diferencias positivas y negativas sobre aproximadamente las mismas zonas. Sin embargo, MPI muestra un resultado diferente para el escenario RCP 8.5. En este escenario se observa un descenso de la potencia eólica en la parte central de la cuenca, desde la costa oeste de la Península Ibérica hasta el mar Jónico con valores significativos en casi toda el área.

Si se comparan las simulaciones forzadas con el mismo modelo para ambos escenarios, se pueden observar varias diferencias y similitudes generales. En la primera simulación (CNRM), la principal diferencia entre los escenarios es que en el escenario RCP 4.5 los incrementos en la potencia eólica abarcan una mayor área que en el escenario RCP 8.5, mostrando más zonas con valores significativos. Para las disminuciones se puede comprobar que es en el escenario RCP 8.5 donde se obtienen valores significativos en un área más amplia.

En el caso de ICHEC, el escenario RCP 8.5 también muestra valores negativos con significatividad en un área mayor a la del escenario RCP4.5 que ocupa toda la parte central de la cuenca. Ambos escenarios coinciden en el aumento significativo que tiene lugar en el mar Egeo.

Para el modelo MPI, ambos escenarios muestran comportamientos muy diferentes. En el caso del RCP 4.5 lo más llamativo es el aumento significativo que tiene lugar en el golfo de León y alrededor de las islas de Córcega, Cerdeña y Sicilia. En el escenario RCP 8.5 estas zonas se caracterizan por un descenso en la potencia eólica, igual que ocurría con la velocidad del viento (Figura 3.12).

En la Figura 3.17 se pueden observar las diferencias de la potencia eólica durante el invierno entre los dos períodos anteriormente mencionados bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.

Para el escenario RCP 4.5, las tres simulaciones muestran valores negativos en la parte sur de la cuenca. En la primera simulación estos valores se concentran en la parte más oriental (mar Levantino), mientras que en las otras dos simulaciones los valores se extienden hacia la costa de Libia y Túnez. Para el modelo MPI, se obtienen los descensos más fuertes ( $-50 \text{ W/m}^2$ ) que son significativos a lo largo de la costa sur de la cuenca.

Sobre el mar Egeo también se puede observar un patrón similar para las tres simulaciones con diferencias positivas ( $30 \text{ W/m}^2$ ). Sin embargo, en el primer caso (CNRM) estos valores se concentran en la zona norte mientras que en los otros dos las diferencias positivas se encuentran más al sur.

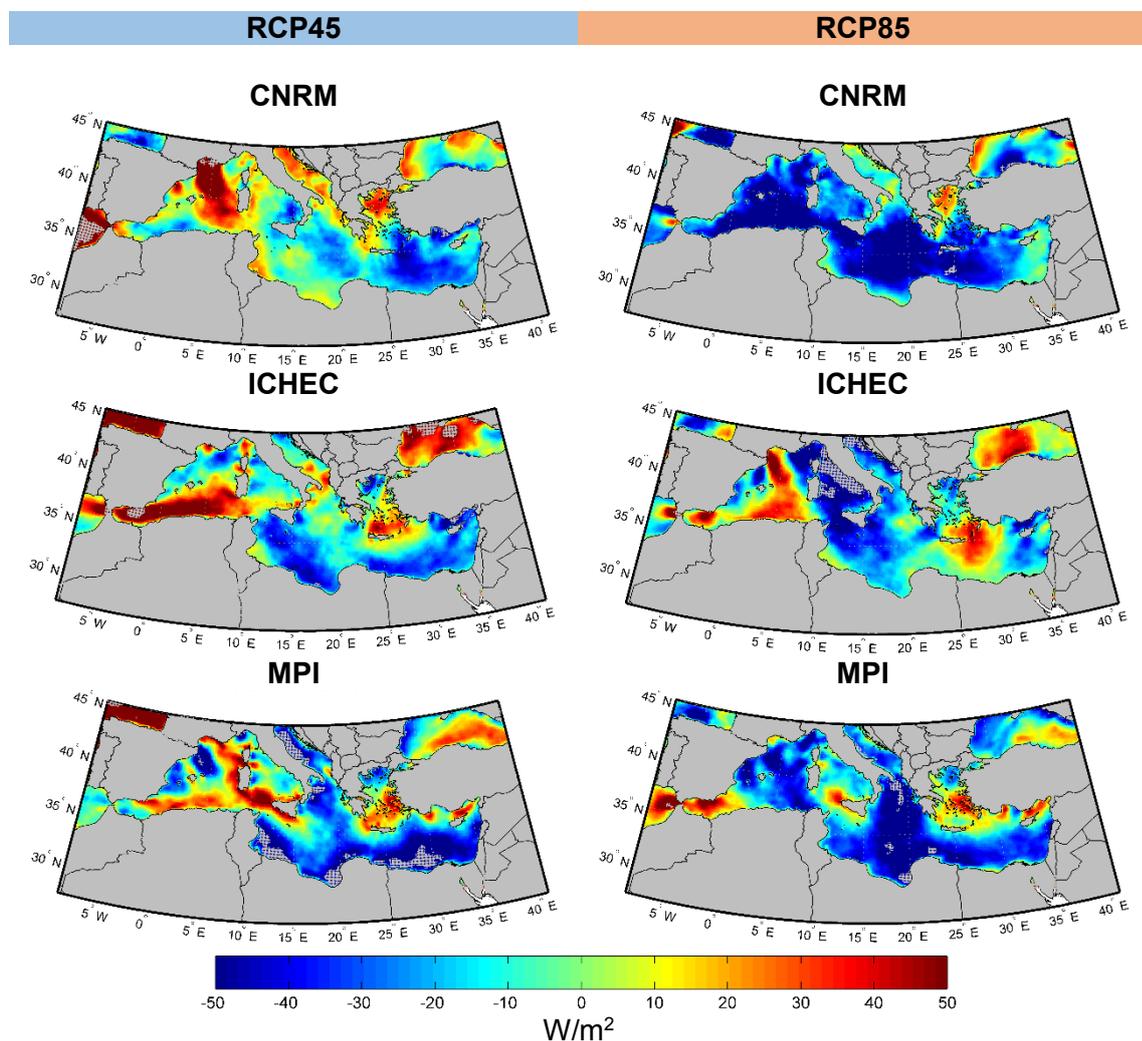


Figura 3.17: Diferencia de potencial eólico entre el periodo 2021-2060 y 1971-2005 durante el invierno los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. Las zonas marcadas con puntos grises indican las diferencias significativas al nivel del 5%.

Las diferencias también muestran comportamientos opuestos entre las simulaciones para las mismas zonas. Para CNRM y MPI se obtiene un aumento en la potencia eólica en la zona del

golfo de León y la costa oeste de Córcega y Cerdeña ( $40 \text{ W/m}^2$ ), mientras que para ICHEC se obtienen valores negativos. Para la simulación de ICHEC también se observan diferencias positivas ( $40\text{-}50 \text{ W/m}^2$ ) en el mar de Alborán que se prolonga hasta casi el mar Tirreno. Sin embargo, para CNRM se obtienen valores principalmente negativos en esta zona. En el mar Adriático también se encuentran comportamientos opuestos entre CNRM y MPI. En el primer caso existen diferencias positivas ( $30 \text{ W/m}^2$ ), mientras que en el segundo estas diferencias son negativas y significativas ( $40 \text{ W/m}^2$ ).

En el escenario RCP 8.5, se aprecia un mayor número de descensos que de aumentos en las tres simulaciones ya que en la mayor parte de la cuenca existe una disminución generalizada de la potencia eólica. Los valores más negativos se obtienen para CNRM ( $-50 \text{ W/m}^2$ ).

En el mar de Alborán y la parte sur del mar Egeo se pueden ver valores positivos de la diferencia para ICHEC y MPI ( $30\text{-}40 \text{ W/m}^2$ ), mientras que para CNRM se producen valores negativos en esa zona.

En la simulación correspondiente a ICHEC también se pueden destacar la zona que va desde el golfo de León hasta la costa de Algeria y la parte oeste del mar Negro donde se observa un aumento de la potencia eólica en torno a  $40 \text{ W/m}^2$  que no es visible en las otras dos simulaciones.

Como se ha mencionado anteriormente, comparando las simulaciones para cada escenario se observan comportamientos muy diferentes. De forma general se puede decir que en el escenario RCP 8.5 se produce un mayor número de zonas con disminución de la potencia eólica para las tres simulaciones. Para la simulación correspondiente a CNRM y MPI, estos valores se extienden prácticamente a lo largo de toda la cuenca, mientras que para ICHEC los descensos se concentran en la parte central. No obstante, estos cambios apenas son significativos para este periodo estacional.

En la Figura 3.18 se representan las diferencias de la potencia eólica para la época primaveral bajo los dos escenarios. Igual que en el caso de la velocidad del viento, en general se puede observar que todas las simulaciones producen un aumento de la potencia eólica en numerosas zonas independientemente del escenario considerado.

Para el escenario RCP 4.5, se obtienen valores positivos de la diferencia sobre el mar Egeo en las tres simulaciones con valores significativos solo en los dos primeros casos (CNRM, ICHEC). En la parte central de la cuenca también se observa una disminución de la potencia eólica en los tres casos, aunque es en la simulación correspondiente a ICHEC donde estas muestran significatividad con valores cercanos a  $-50 \text{ W/m}^2$  en el mar Tirreno.

Al igual que en el caso del invierno, las diferencias también siguen patrones diferentes en las mismas zonas dependiendo del modelo forzante. Así, para CNRM y MPI existe un aumento en la zona del golfo de León con valores que llegan a  $50 \text{ W/m}^2$ , mientras que para ICHEC se observa un descenso. Por otro lado, ICHEC muestra un importante aumento en la zona del mar de Alborán que no se observa en las otras simulaciones.

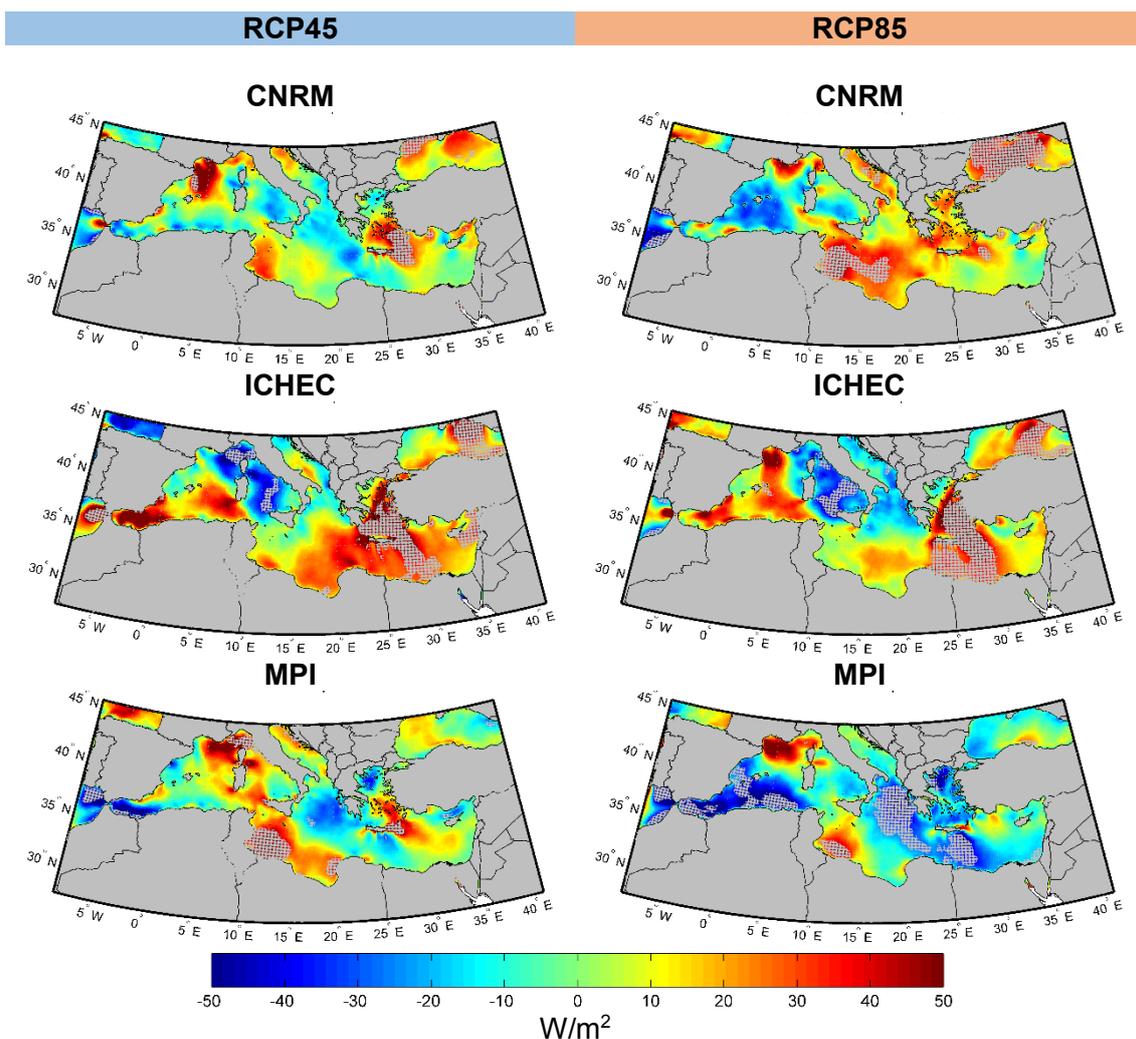


Figura 3.18: Diferencia de potencial eólico entre el periodo 2021-2060 y 1971-2005 durante la primavera para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. Las zonas marcadas con puntos grises indican las diferencias significativas al nivel del 5%.

Para el escenario RCP 8.5, las tres simulaciones no muestran un comportamiento muy similar. En el primer caso (CNRM) los cambios negativos se concentran en la zona más occidental de la cuenca, en torno a las Islas Baleares con valores de  $-30 \text{ W/m}^2$ . En el resto de la cuenca se obtienen diferencias positivas que son significativas en la costa de Túnez y en la parte oeste del mar Negro. Para ICHEC los valores negativos ( $-40 \text{ W/m}^2$ ) se distribuyen en la parte central,

alrededor de la costa Italiana, mientras que en el resto de la cuenca existe un aumento de la potencia eólica con valores significativos en el mar Egeo y la costa de Egipto. Por último, para el modelo MPI se produce un descenso de la potencia eólica en prácticamente toda la cuenca excepto en dos áreas, el golfo de León y la costa de Túnez, donde se observan valores positivos, aunque no significativos, próximos a  $30 \text{ W/m}^2$ .

Si se comparan las simulaciones de cada escenario forzadas con el mismo modelo, las mayores diferencias se encuentran para la simulación de MPI. En este caso, en el escenario RCP 8.5 se obtienen descensos de la potencia eólica en la mayor parte de la cuenca, mientras que RCP 4.5 muestra un aumento en numerosas zonas. Para CNRM también existen diferencias principalmente debidas a la magnitud y distribución espacial de los valores negativos. En el escenario RCP4.5 estos valores se encuentran principalmente en la zona central de la cuenca y son de menor magnitud que los obtenidos en el RCP 8.5. ICHEC es el que mantiene una mayor continuidad entre los dos escenarios.

Las diferencias de la potencia eólica para el verano se muestran en la Figura 3.19, para los dos escenarios estudiados. Durante esta estación, se observa un claro aumento de la potencia eólica en el mar Egeo para ambos escenarios. También se puede ver que los valores positivos y negativos de la diferencia muestran una distribución espacial similar en ambos escenarios. Sin embargo, existen importantes diferencias entre las simulaciones correspondientes a los diferentes GCMs dentro de un mismo escenario.

Para el escenario RCP 4.5, la primera simulación con CNRM muestra un aumento generalizado de la potencia eólica en casi toda la cuenca a excepción de la costa de Túnez y el mar Levantino donde se observan ligeros descensos ( $-10 \text{ W/m}^2$ ). Cabe destacar el comportamiento observado en el golfo de León donde se obtienen valores positivos de la diferencia en torno a  $40\text{-}50 \text{ W/m}^2$ . Este patrón contrasta con el obtenido en la simulación de ICHEC ya que es el golfo de León donde se obtienen los valores negativos más significativos ( $-50 \text{ W/m}^2$ ). Además, en este caso la mayor parte de la cuenca muestra un descenso en la potencia eólica.

En la última simulación (MPI) el patrón obtenido también es distinto al de las simulaciones anteriores. Los descensos se observan principalmente en la parte central de la cuenca alrededor de la costa Italiana y en el mar Levantino.

Para el escenario RCP 8.5, las tres simulaciones muestran un patrón muy similar al del escenario RCP4.5 respecto a la distribución espacial de las diferencias positivas y negativas.

Sin embargo, en este último escenario tanto los aumentos como los descensos son más intensos.

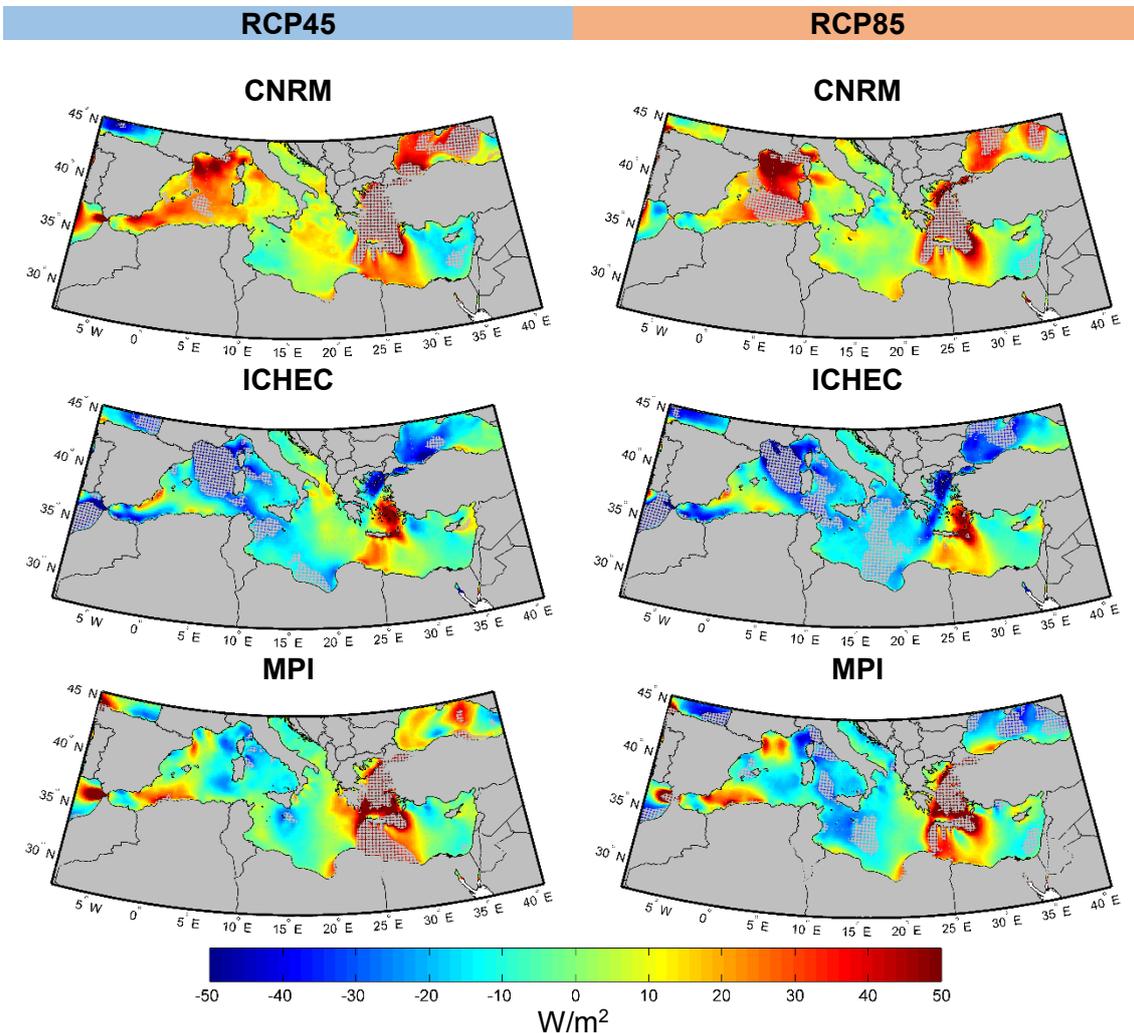


Figura 3.19: Diferencia de potencia eólica entre el periodo 2021-2060 y 1971-2005 durante el verano para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. Las zonas marcadas con puntos grises indican las diferencias significativas al nivel del 5%.

En la Figura 3.20 se pueden observar las diferencias de la potencia eólica durante el otoño. Para esta estación las diferencias negativas sobre el Mediterráneo central aumentan de nuevo mostrando un patrón similar al observado en invierno.

Para el escenario RCP 4.5, se obtiene un patrón muy similar en las dos primeras simulaciones (CNRM, ICHEC). La cuenca occidental y central se caracteriza por un descenso en la potencia eólica mostrando valores negativos de la diferencia más intensos, aunque sin apenas significatividad, en casi toda la zona para la primera simulación (CNRM). En esta zona también hay que destacar dos pequeñas áreas con valores positivos en el golfo de León y el golfo de Venecia obtenidas en la primera simulación (CNRM), que se desplazan hacia el sur en la

segunda simulación (ICHEC). En la parte oriental se observan diferencias positivas con valores máximos en la parte oeste del mar Negro para las dos simulaciones (40-50 W/m<sup>2</sup>).

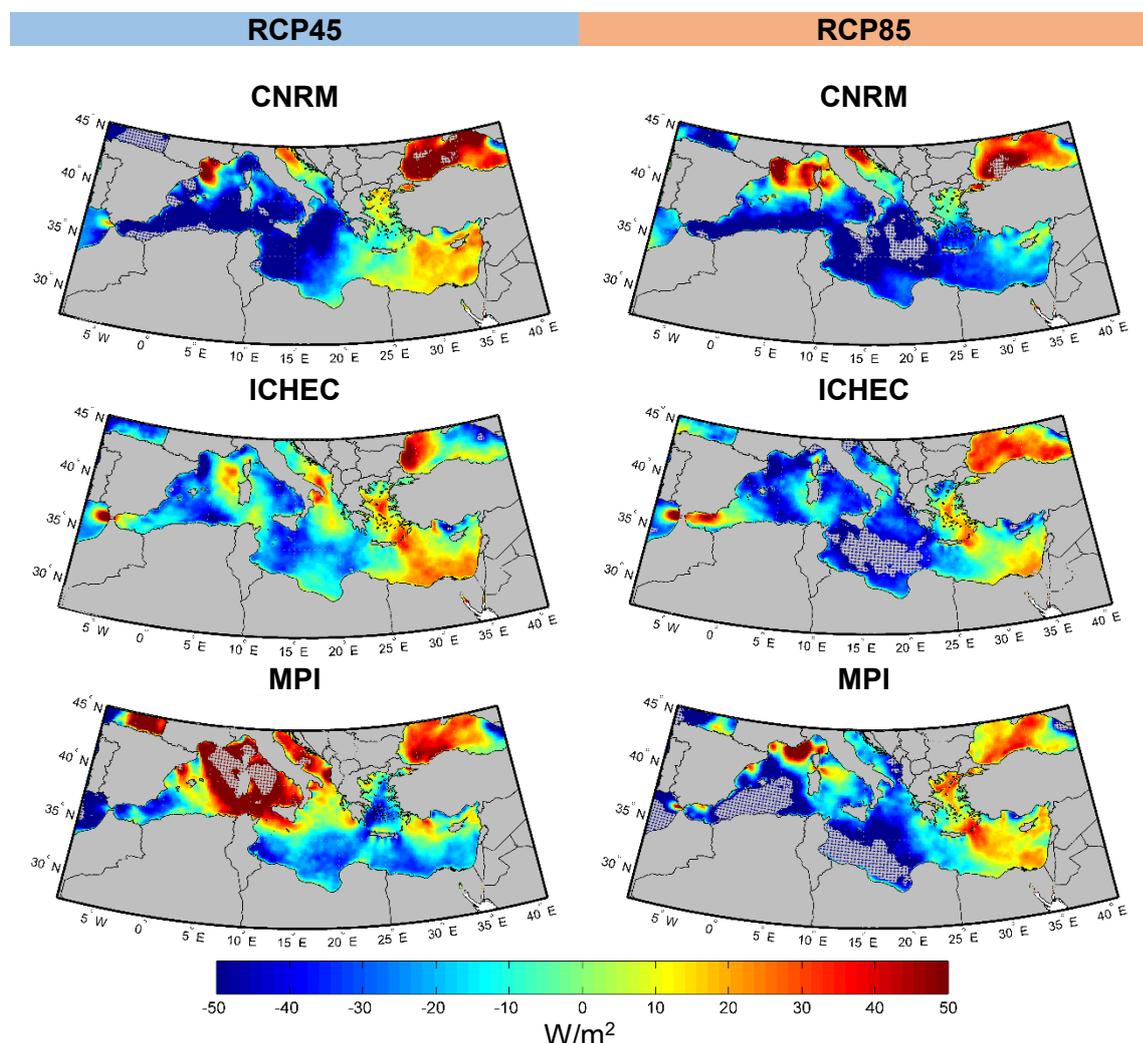


Figura 3.20: Diferencia de potencial eólico entre el periodo 2021-2060 y 1971-2005 durante el otoño para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. Las zonas marcadas con puntos grises indican las diferencias significativas al nivel del 5%.

En la figura obtenida en la simulación con MPI se puede observar un comportamiento similar a las anteriores simulaciones en el mar Negro, donde se obtienen valores positivos de la diferencia, aunque sin llegar a ser significativos. En el resto de la cuenca destaca el aumento significativo de la potencia eólica que existe en la parte central alrededor de las islas de Córcega, Cerdeña y Sicilia, no observado con los otros dos modelos.

Para el escenario RCP 8.5, las tres simulaciones también muestran alguna diferencia entre sí y en relación al escenario anterior. En este caso, se observan descensos en la mayor parte de la cuenca para los tres casos.

Para la primera simulación se obtiene un descenso de la potencia eólica en toda la parte sur de la cuenca con los valores más intensos y significativos en el mar Jónico ( $-50 \text{ W/m}^2$ ). En la parte norte se observan valores positivos de la diferencia en el golfo de León, alrededor de la isla de Córcega, el golfo de Venecia y el mar Negro.

En el caso de ICHEC se observa un patrón ligeramente distinto con valores positivos en la zona sur localizados en el mar de Alborán y el mar Levantino. Los valores negativos se concentran en toda la zona central y oeste de la cuenca con valores significativos en la costa de Libia.

La simulación con MPI muestra un patrón intermedio entre las dos simulaciones anteriores con valores negativos en la parte sur de la cuenca, a excepción del mar Levantino donde se obtienen valores positivos. En este caso las diferencias negativas significativas se obtienen en la zona que va desde las islas Baleares hasta la costa de Algeria y en la costa de Túnez y Libia.

Si se comparan los dos escenarios descritos para las simulaciones realizadas con el mismo modelo se observa que la mayor diferencia se obtiene en el caso de las simulaciones con MPI. En el caso de RCP 4.5 lo más destacable es el gran aumento de la potencia eólica que se produce en el golfo de León, el mar Tirreno y el mar Adriático, mientras que en RCP 8.5 estas zonas se caracterizan principalmente por valores negativos de la diferencia, aunque no lleguen a ser significativos.

Igual que en el caso de la velocidad del viento, se ha comprobado que existen diferencias para los dos escenarios analizados. De forma general se puede decir que en el escenario RCP 8.5 se observan más zonas que muestran un descenso de la potencia eólica. Además, estos descensos son más intensos en este escenario mostrando en casi todas las situaciones valores más negativos de la diferencia de la potencia eólica que en el caso del escenario RCP 4.5.

Las zonas que muestran más variaciones en la potencia coinciden con las que muestran un mayor cambio en las diferencias de viento (mar de Alborán, golfo de León, zona central de la cuenca y mar Egeo).

Comparando los períodos estacionales, como es de esperar, los cambios en la potencia eólica siguen un patrón muy similar al de la diferencia de viento. Durante el invierno se ha observado una importante disminución de la potencia eólica sobre la parte central y oriental del Mediterráneo para los dos escenarios. Durante la primavera estas diferencias negativas disminuyen sobre toda la cuenca y se mantiene en casi todas las simulaciones durante el

verano. Las diferencias negativas aumentan otra vez durante el otoño sobre la parte central del Mediterráneo mostrando un patrón similar al del invierno. Sin embargo, la significatividad de estos cambios es más notoria en las estaciones de primavera y verano.



## 4. CONCLUSIONES

La energía eólica marina desempeña actualmente un papel central en el panorama energético de los países desarrollados, ya que es una buena opción para reducir la dependencia energética de los combustibles fósiles. Por lo tanto, es esencial conocer el impacto que los futuros cambios en las condiciones climáticas pueden tener sobre este importante recurso energético.

Aprovechando la iniciativa EURO-CORDEX, en el presente trabajo se ha analizado cómo afectará el cambio climático a la energía eólica en el área de la cuenca mediterránea, considerando dos escenarios futuros de calentamiento (RCP 4.5 y RCP 8.5). Este análisis permitirá determinar si las tendencias en la velocidad del viento y la potencia eólica experimentan algún cambio teniendo en cuenta nuevas proyecciones climáticas futuras a partir de datos de alta resolución espacial.

En primer lugar se ha llevado a cabo una evaluación de los datos de la velocidad del viento para el periodo 1971-2005, comparando las simulaciones de EURO-CORDEX obtenidas con el modelo regional RCA4 y las simulaciones obtenidas con el mismo modelo regional forzadas con los datos de ERA-Interim. Tanto el análisis anual como estacional han mostrado que los patrones de la velocidad del viento están generalmente bien representados por las simulaciones de EURO-CORDEX.

Después del análisis de evaluación, se ha realizado un estudio de las proyecciones futuras para la velocidad del viento y la potencia eólica para el período 2021-2060 considerando los dos escenarios mencionados anteriormente.

Para comentar las conclusiones más importantes que se pueden obtener del análisis de ambos escenarios, la cuenca del Mediterráneo se ha dividido en varias zonas. Por simplicidad solo se hace referencia a los resultados de la potencia eólica. A continuación se muestra el escenario RCP 4.5:

- **Mar de Alborán:** De las tres simulaciones analizadas en términos anuales, solo en la correspondiente a ICHEC se ha visto un aumento significativo de la potencia eólica (20-30 W/m<sup>2</sup>). Esto es debido a los incrementos observados en invierno y en primavera

con valores que pueden superar los 50 W/m<sup>2</sup>. Por otro lado, para la simulación de CNRM solo se han observado aumentos durante el verano que no llegan a ser significativos, mientras que para MPI no se observan incrementos si no descensos de la potencia que tampoco llegan a ser significativos.

- **Golfo de León:** En esta zona dos simulaciones (CNRM y MPI) producen un aumento significativo de la potencia eólica (40 W/m<sup>2</sup>) en el análisis anual, mientras que ICHEC muestra una disminución también significativa (-40 W/m<sup>2</sup>). En este caso los análisis estacionales indican que para CNRM se producen aumentos para todas las estaciones, con significatividad en invierno y primavera. Las simulaciones con MPI también muestran un incremento significativo en otoño y en el resto de las estaciones presentan incrementos salvo en verano donde se ven pequeños descensos que no llegan a ser significativos. Por el contrario, el modelo ICHEC muestra descensos en el área que se hacen significativos en verano.
- **Centro de la cuenca (mar Tirreno, mar Jónico, mar Adriático y sur de Sicilia):** Las tres simulaciones muestran diferentes patrones anuales. La simulación del CNRM y del ICHEC son las más parecidas con disminuciones en la mayor parte del área salvo en el mar Adriático que en un caso presenta aumentos en el golfo de Venecia y en el otro los aumentos se desplazan al golfo de Manfredonia y pierden significatividad. La simulación con el modelo MPI muestra, por el contrario, valores positivos significativos (30 W/m<sup>2</sup>) alrededor de las islas de Córcega, Cerdeña y Sicilia. En el análisis estacional las dos primeras simulaciones repiten el patrón anual con mayor o menor intensidad en los cambios pero sin apenas valores significativos de importancia. En la última simulación con MPI el análisis estacional presenta generalmente incrementos alrededor de las islas de Córcega, Cerdeña y Sicilia destacando los incrementos significativos observados en otoño (>50 W/m<sup>2</sup>).
- **Mar Egeo:** En el análisis anual se ha observado un aumento significativo de la potencia eólica en esta zona para todas las simulaciones. Teniendo en cuenta las simulaciones estacionales, se observa que en primavera y verano es donde mayor significatividad tiene los incrementos observados en la potencia del viento con valores que rondan los 30-40 W/m<sup>2</sup>.
- **Este de la cuenca:** Las variaciones anuales para esta región no muestran apenas cambios y si se observan pequeños descensos como los de la simulación forzada con el modelo MPI que no llegan a ser significativos. En el análisis estacional CNRM muestra descensos significativos en verano, ICHEC incrementos significativos en primavera y MPI se decanta por los descensos que llegan ser significativos en invierno.

En el resto de estaciones las simulaciones muestran variabilidad en el signo de los cambios. Cambios que no llegan a ser significativos.

En el caso del escenario RCP 4.5 se puede decir, de forma general, que se obtienen un mayor número de áreas donde, tanto la velocidad del viento como la potencia eólica tienden a aumentar en relación al escenario RCP 8.5. Por otro lado, los descensos observados en la potencia para el escenario RCP 8.5, muestran valores negativos más elevados que en el caso del escenario RCP 4.5.

Estos resultados se pueden comparar con los obtenidos por Koletsis et al. (2016), quienes analizaron los cambios en la potencia eólica entre un período actual (1961-1990) y futuro (2021-2050) similar al considerado en este trabajo. El estudio estaba basado en simulaciones de RCMs forzadas con los antiguos escenarios A1B y A2, comparables al escenario RCP4.5 y RCP8.5 analizados aquí. Estos autores también observaron diferencias máximas alrededor de  $50 \text{ W/m}^2$  para ambos escenarios y también encontraron algunas discrepancias en las áreas con aumento/disminución de la potencia eólica. Así, sólo tres simulaciones del escenario A1B revelaron un claro aumento sobre el mar Egeo y la parte más occidental del mar Negro. Considerando las dos simulaciones realizadas por el mismo RCM (HIRHAM5), también se observaron algunas diferencias en la magnitud y distribución espacial del aumento de la potencia. La simulación forzada por ECHAM5 presentó diferencias positivas en una pequeña área del mar Egeo y sobre la parte más occidental del mar Negro. Por otro lado, la simulación forzada por BCM mostró un claro aumento de la potencia en todo el mar Egeo y el Adriático. También se observaron diferencias positivas al sur del golfo de León.

De acuerdo a este estudio y teniendo en cuenta la escala de áreas de energía eólica en función del rango de viento medio a partir de la velocidad del viento a 10 m del suelo [Balog et al., 2016], podemos decir que prácticamente toda la cuenca del Mediterráneo, salvo algunas zonas de la región más oriental, se pueden considerar por encima de la escala 3 que es por encima de la cual los parques eólicos comerciales se pueden considerar rentables. No obstante, destacan sobre las demás áreas de la cuenca, las regiones del mar de Alborán, mar Egeo, y golfo de León, que se encuentran entre los valores 6 y 7, de la escala, lo que equivale a decir que se trata de un emplazamiento excepcional o magnífico. Además en el caso particular del mar Egeo y del Golfo de León las simulaciones para el futuro cercano, 2021-2060, tanto en el escenario RCP4.5 como RCP8.5 predicen un aumento del viento medio.



## 5. REFERENCIAS

- Balog, I., Ruti, P.M., Tobin, I., Armenio, V., Vautard, R. (2016). A numerical approach for planning offshore wind farms from regional to local scales over the Mediterranean. *Renewable Energy* 85 395-405.
- Bazo, J. (2014). Proyecciones climáticas sobre Perú y su relación con el fenómeno ENSO. Tesis Doctoral, Universidade de Vigo.
- Global Wind Energy Council (GWEC), (2016). Informe Global del viento: actualización anual del mercado.
- Hoogwijk M, De Vries B, Turkenburg W. (2004). Assessment of the global and regional geographical, technical and economic potential of onshore wind energy. *Energy Economics*; 26: 889–919.
- IPCC, (2013). Cambio Climático 2013: La base científica física. Contribución del Grupo de Trabajo I del Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. TF Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, SK Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, y PM Midgley, (eds.), Cambridge University Press.
- Koletsis, I., Kotroni, V., Lagouvardos, K., Soukissian, T. (2016). Assessment of offshore wind speed and power potential over the Mediterranean and the Black Seas under future climate changes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60, 234-245.
- Moss, R.,H., Edmonds, J.,A., Hibbard, K.,A., Manning, M.,R., Rose, S.,K., van Vuuren, D.,P., Carter, T.,R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.,A., Mitchell, J.,F., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.,J., Stouffer, R.,J., Thomson, A.,M., Weyant, J.,P., Wilbanks, T.,J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*. 463(7282):747-56
- World Wind Energy Association (WWEA), (2015). Boletín edición especial.

### PÁGINAS WEB CONSULTADAS

- CORDEX: <http://www.icrc-cordex2016.org/index.php/about/what-is-cordex>
- MATLAB: <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>
- Ministerio de agricultura y pesca, alimentación y medio ambiente de España:  
<http://www.mapama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/que-es-el-cambio-climatico-y-como-nos-afecta/>
- Observatorio de Salud y Cambio Climático:  
[http://www.oscc.gob.es/es/general/salud\\_cambio\\_climatico/Nuevos\\_escenarios\\_emision\\_RCPs.htm](http://www.oscc.gob.es/es/general/salud_cambio_climatico/Nuevos_escenarios_emision_RCPs.htm)
- Test de Wilcoxon Rank Sum:  
[https://es.mathworks.com/help/stats/ranksum.html?searchHighlight=ranksum&stid=doc\\_srchtile](https://es.mathworks.com/help/stats/ranksum.html?searchHighlight=ranksum&stid=doc_srchtile)