Avances en Ciencias de la Tierra

Volumen 11, Diciembre 2021

ISSN 2172-9328

Editado por EPHYSLAB en colaboración con la Asociación Ambiental ESCLIMA

Equipo Editorial (responsable de este volumen)

Editores en Jefe:

D. Fernández-Nóvoa EPhysLab, CIM-UVIGO Universidade de Vigo diefernandez@uvigo.es

Editores

O. García-Feal EPhysLab, CIM-UVIGO Universidade de Vigo orlando@uvigo.es

M. Des EPhysLab, CIM-UVIGO Universidade de Vigo mdes@uvigo.es

X. Costoya EPhysLab, CIM-UVIGO Universidade de Vigo xurxocostoya@uvigo.es

A.J.C. Crespo EPhysLab, CIM-UVIGO Universidade de Vigo alexbexe@uvigo.es

J. M. Domínguez EPhysLab, CIM-UVIGO Universidade de Vigo jmdominguez@uvigo.es **R. Varela** EPhysLab, CIM-UVIGO Universidade de Vigo ruvarela@uvigo.es

J. González Cao EPhysLab, CIM-UVIGO Universidade de Vigo jgcao@uvigo.es

M.C. Sousa CESAM/Physics Department Universidade de Aveiro mcsousa@ua.pt

M. de Castro EPhysLab, CIM-UVIGO Universidade de Vigo mdecastro@uvigo.es

M. Gómez-Gesteira EPhysLab, CIM-UVIGO Universidade de Vigo mggesteira@uvigo.es Avances en Ciencias de la Tierra

Introducción

La revista *Avances en Ciencias de la Tierra* (ACT) es una publicación científica centrada en los distintos ámbitos de conocimiento relacionados con las Ciencias de la Tierra. A diferencia de otras publicaciones científicas centradas en el mismo ámbito, muchas de las cuales se encuentran indexadas dentro del *Science Citation Index* (SCI), ACT tiene una doble vertiente. Por un lado, como muchas de las anteriormente citadas publicaciones, mantiene una vertiente científica y, por otro lado, pretende añadir un cierto carácter docente a los trabajos que en ella se publican. Esto último, claro está, sin perder un ápice de su rigor científico. Esto hace que la revista ACT sea, primero, un banco de pruebas donde alumnos de diversos grados y másteres aprendan las técnicas de publicación científica y, segundo, una publicación científica al uso donde el rigor científico en los contenidos alcance los mismos niveles que en la mayoría de las publicaciones científicas "tradicionales".

Uno de los objetivos principales de la investigación científica es la publicación de sus resultados con el fin de que éstos puedan ser compartidos con el resto de la comunidad científica con el fin de difundirlos, validarlos y corroborarlos o rebatirlos. La publicación de una investigación científica, usualmente en forma de un artículo científico, requiere de una labor de escritura que no resulta sencilla ya que hay una serie de principios y técnicas que deben conocerse y respetarse con el fin de comunicar lo más claramente posible el resultado de dicha investigación a una audiencia experta y profesional. Estos principios fundamentales que deben regir la escritura de un buen artículo científico son tres: brevedad, claridad y precisión. Partiendo de estos tres principios fundamentales, nuestra labor como docentes tiene como objetivo enseñar a los alumnos las normas metodológicas generales que les permitan escribir un buen artículo.

Las características principales de un buen artículo científico, las cuales los alumnos que pretendan sumergirse en la escritura de los mismos deben conocer, son:

• Un artículo científico es un informe sobre los resultados de una investigación relativa a un problema de carácter científico.

• Los resultados de dicha investigación deben ser válidos, fidedignos y reproducibles, a fin de que puedan ser contrastados por el resto de la comunidad científica.

iii

• Los resultados presentados deben ser originales, por lo tanto, un artículo no debe comunicar unos hallazgos que ya hayan sido previamente descritos por los miembros de la comunidad científica. Existe la excepción de los llamados artículos de revisión, donde los autores revisan el estado del conocimiento sobre un cierto tema, para lo cual compilan los resultados presentados en artículos previamente publicados.

La estructuración del artículo científico es uno de los aspectos a los que se debe prestar también mucha atención. Usualmente los artículos científicos se estructuran de la siguiente forma: primero, además del título, el cual debe ser claro, exacto y conciso, y de la lista de autores, el artículo debe contener un breve resumen donde se describan de forma somera los principales logros de la investigación; a continuación, se debe escribir una introducción de carácter general, para posteriormente detallar los datos y la metodología empleada; posteriormente deben presentarse los resultados, así como una discusión en la que se relacionen los avances mostrados en el manuscrito con el conocimiento previo contenido en la bibliografía. Para ello es necesario que el alumno haya realizado con anterioridad una completa búsqueda bibliográfica que también debe incluirse en el manuscrito. Finalmente, y con carácter opcional, se puede incluir una conclusión, en la que se enumeren y resuman los principales hallazgos de la investigación. Además de lo anterior, no se pueden dejar de lado aspectos formales como, por ejemplo, el empleo de un lenguaje correcto y conciso.

Para asegurar que los artículos publicados supongan un avance significativo en el área de conocimiento se han diseñado los mecanismos de control de la calidad necesarios. Por un lado, se involucrará en la elaboración de los artículos a los supervisores del trabajo, de tal forma que aporten su experiencia en la escritura y estructuración de artículos científicos y, por otro lado, la calidad científica de los artículos será evaluada por dos revisores miembros del equipo editorial y/u otros externos que éstos consideren.

El idioma empleado será, preferiblemente, el español, aunque también existe la posibilidad de presentar los trabajos en gallego, portugués o inglés.

El Equipo Editorial.

Diciembre de 2021.

Contenido

Impacto del cambio climático en cuatro especies de bivalvos de interés socioeconómico en las Rías Baixas, Galicia. A. Castro-Olivares, M. Des, M. deCastro

 Avances en Ciencias de la Tierra

Impacto del cambio climático en cuatro especies de bivalvos de interés socioeconómico en las Rías Baixas, Galicia

A. Castro-Olivares*, M. Des, M. deCastro

*adrian.castro.olivares@alumnos.uvigo.es EPhysLab (Environmental Physics Laboratory), Facultade de Ciencias, Universidade de Vigo, Campus As Lagoas s/n, Ourense, Spain

RESUMEN

El aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero contribuye al calentamiento global y, en consecuencia, a un aumento de la temperatura media global de los océanos. Los impactos del cambio climático afectan tanto a hábitats terrestres como marinos, repercutiendo en la producción primaria y en actividades económicas y sociales. Los bivalvos Cerastodema edule, Rudapites decussatus, Venerupis corrugata y Rudapites philippinarum forman parte de las especies más importantes desde el punto de vista socioeconómico en las costas de Galicia. La temperatura del agua de fondo se calculó en las Rías Baixas durante los meses de julio y agosto mediante el modelo hidrodinámico Delft3D-Flow, forzado con datos climáticos de los proyectos CORDEX y CMIP5 para los periodos histórico (1999-2018) y futuro (2080-2099) bajo el escenario de trayectoria de concentración representativa 4.5 (RCP4.5, por sus siglas en inglés). Los datos de salida permitieron obtener mapas de confort térmico para cada especie, haciendo posible analizar su distribución geográfica. Los mapas de confort muestran que, en la actualidad, gran parte de las áreas de confort se encuentran en zonas internas para R. decussatus y C. edule, y en zonas con profundidades menores a 10 m para V. corrugata. En el futuro, el incremento de la temperatura proyectada para toda la columna de agua produciría un aumento de las áreas de confort las cuales podrían desplazarse hacia zonas más externas y profundas de las rías. En las zonas internas y someras el calentamiento oceánico podría impactar negativamente en la productividad de las especies analizadas al disminuir el índice de confort térmico. La extensión de área cultivable podría aumentar en un futuro próximo para las especies R. decussatus, C. edule y R. philippinarum. Sin embargo, para la especie V. corrugata, dicha extensión podría disminuir, pudiendo verse comprometida su productividad en las costas gallegas.

Palabras Clave: Bivalvos, Cambio climático, Delft3D, RCP4.5, Rías Baixas.

1. Introducción

Los impactos del cambio climático son el resultado de una serie de retroalimentaciones climáticas positivas impulsadas por el forzamiento radiativo. El aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (CO₂ en particular) desde el inicio de la revolución industrial es uno de los factores más importantes (Meehl et al., 2007). Las diferentes alteraciones y modificaciones en el clima, que encaminan una inercia positiva, repercutirán tanto directa como indirectamente sobre las actividades humanas (Doney et al., 2012) trascendiendo sobre las condiciones ambientales de ecosistemas terrestres y marinos (Des et al., 2020a). La evaluación de los efectos del cambio

climático ante las vulnerabilidades de dichos ecosistemas se convierte en una actividad necesaria para la planificación y establecimiento de planes de mitigación y adaptación a medio y largo plazo.

Los bivalvos marinos que habitan en zonas intermareales son especialmente vulnerables а las alteraciones climáticas. Como organismos ectotermos, su biología y fisiología se ven puramente condicionadas por la fluctuación de los diferentes factores físicos y biológicos que los rodean. La capacidad de crecimiento, el éxito reproductivo y la supervivencia en bivalvos depende de factores ambientales como la hidrodinámica de la estratificación, la zona. la acidificación, la disponibilidad de oxígeno y nutrientes, la salinidad y la temperatura del agua. La temperatura del agua es uno de los factores clave, ya directamente que se encuentra relacionada con el rendimiento, los niveles de actividad y los índices fisiológicos de estos organismos. Además, distribución limita la geográfica de los bivalvos (Sobral y Widdows, 1997). Por lo tanto, un aumento de la temperatura del agua debido al calentamiento global podría llevar а los organismos, las comunidades y a los ecosistemas más allá de sus capacidades, pudiendo llegar a representar la extinción de especies debido a su limitada capacidad para cambiar de área de distribución.

Las Rías Baixas, en la costa Noroeste de la Península Ibérica (NOPI), es una de las regiones del mundo con mayor productividad primaria (Vilas et al., 2005). Distintas pesquerías (Peleteiro et al., 2008) explotan la plataforma continental, siendo el marisqueo una de las más relevantes de Europa con relación a desembarcos (FAO 2018) y a escala local desde el punto de vista socioeconómico (Domínguez et al., 2021). Las especies comerciales más importantes de bivalvos infaunales son el berberecho Cerastoderma edule (Linnaeus, 1758), las nativas almeja fina Ruditapes decussatus (Linnaeus, 1758) y almeja babosa Venerupis corrugata (Gmelin, 1791) v la introducida almeja japónica Ruditapes philippinarum (Adams y Reeve, 1850; Domínguez et al., 2021). Las cuatro especies alimentan la mayor pesquería artesanal de España en términos de desembarcos empleo (~7.900 y toneladas de bivalvos con un valor de ~74 millones de euros y ~7.100 mariscadores en 2019) (Macho et al., 2016; www.pescadegalicia.com).

Los modelos numéricos son una herramienta útil para comprender y proyectar los efectos del cambio climático y sus interacciones (Des, 2020a). Las soluciones que ofrecen permiten investigar los efectos de los cambios en una o varias componentes del sistema climático (McGuffie y Henderson-Sellers, 2014). Dentro del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP5) se han ejecutado modelos climáticos globales (MCGs) en base a cuatro escenarios de trayectoria concentración de representativa: RCP2.6, 4.5, 6.0 y 8.5 (Nailawar v Waikar, 2019). Sin embargo, la diferencia de escala espacial entre la resolución de estos modelos y la necesaria para la mayoría de los estudios de impacto ha dado lugar a la necesidad de desarrollar técnicas de reducción de escala, conocidas como *downscalling*, que permiten realizar proyecciones a escala regional o local a partir de la información conocida a escala global (Estrada et al., 2010).

1.1. Objetivos

El objetivo principal de este estudio es analizar los posibles impactos del cambio climático, y en concreto, del aumento de la temperatura del océano, sobre las especies de alto valor socioeconómico Cerastodema edule, *Rudapites* decussatus, Venerupis corrugata y Rudapites philippinarum bajo el escenario RCP4.5 en las Rías Baixas. Para ello, se utilizó el modelo numérico Delft3D para realizar un downscalling de las variables climáticas obtenidas de los modelos climáticos globales y regionales para el periodo histórico (1999-2018) y el futuro (2080-2099).

Las salidas de temperatura del agua del fondo son utilizadas para: 1) analizar el porcentaje de tiempo durante el cual la temperatura del agua del fondo se sitúa dentro del rango de temperatura óptima para cada especie estudiada (índice de confort), 2) evaluar los posibles efectos del cambio climático en la distribución geográfica de las zonas de confort de cada especie bajo el escenario futuro en comparación con la distribución histórica obtenida y 3) analizar la variación del índice de confort en las áreas cultivables (zonas donde la profundidad es menor a 10 m).

2. Datos y procedimiento

2.1. Área de estudio

Las Rías Baixas (figura 1) son cuatro valles incisos inundados divididos generalmente en tres sectores (parte interna, media y externa) en base a las características hidrodinámicas y sedimentológicas. La parte externa se localiza en la entrada de la ría y es el área con mayor influencia oceánica. En la parte media se dan condiciones bajas de energía debido al equilibrio entre mareas y corrientes fluviales. La parte interna se corresponde con la zona menos profunda de la ría, donde desemboca el río principal e hidrodinámicamente está dominada por las descargas fluviales (Vilas et al., 2005). Hidrodinámicamente, las rías se comportan como estuarios parcialmente mezclados siendo la circulación residual típicamente positiva (Prego y Fraga, 1992).

La circulación atmosférica en la región favorece la predominancia de vientos costeros de dirección ecuatorial los cuales, junto a la orientación de la costa en el área, favorecen la ocurrencia de eventos de afloramiento costero (Rosón et al., 2008).



Fig. 1. Área modelada. El rectángulo negro indica el área de estudio.

El régimen de mareas es semidiurno y mesomareal. con un periodo de aproximadamente 12,25 horas y una amplitud de 2 m en mareas muertas y 4 m en mareas vivas (Sousa et al., 2014). El ciclo anual de temperatura para el agua del fondo es muy distinto al del superficial, agua y con menor oscilación. Los mínimos se alcanzan en verano (aproximadamente 13 °C de julio a agosto) a consecuencia de la entrada de agua subsuperficial debido al fenómeno del afloramiento.

2.2. Modelo numérico

La temperatura del fondo del área de estudio se calculó usando el módulo Flow del modelo numérico Delft3D. Las simulaciones se realizaron utilizando la malla y la parametrización previamente implementadas y validadas para las Rías Baixas por Des et al. (2019, 2020a).

La malla computacional usada por el modelo abarca desde 9,20° O a 8,55° O y desde 42,05° N a 42,09° N (figura 1, rectángulo). La resolución de la malla aumenta desde 2200×800 m en la frontera oeste hasta 220×140 m en las Rías Baixas. En la vertical, la malla se compone de 16 capas sigma. Las capas superiores poseen un refinado mayor para una mejor reproducción de la interacción atmósfera-océano.

La batimetría utilizada se creó a partir de la recopilación de datos de distintas fuentes: los datos para las rías de Arousa y Muros se obtuvieron de las cartas náuticas del Instituto Hidrográfico de la Marina Española, los de las rías de Vigo y Pontevedra fueron por proporcionados la Secretaría General Pesca. de v los correspondientes de а zona la plataforma advacente se descargaron de la Carta Batimétrica General de los Océanos (GEBCO).

Para reproducir el nivel del mar se introdujeron los componentes armónicos de las mareas (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, MsF, MM, M4, MS4, MN4), obtenidos a partir del modelo TPXO 7.2 TOPEX/Poseidon Altimetry (http://volkov. oce.orst.edu/tides/global.html), como forzamiento astronómico en el límite oceánico abierto. Las descargas fluviales se obtuvieron del Hype Web portal (https://hypeweb.smhi.se) y se impusieron en el modelo como límite fluvial abierto. Se consideró una reducción del 10% de la descarga para provecciones futuras bajo las el RCP4.5 escenario siguiendo (https://hypeweb.smhi.se/explore water/climate-change-data/europe climate-change/).

El modelo "flujo absoluto, radiación solar neta" se utilizó para simular el intercambio de calor a través de la superficie libre. Las componentes del viento y los valores de la presión se impusieron variando espacialmente. Como fuente de datos de las variables atmosféricas se utilizaron las salidas del modelo regional MOHC HadGEM2-Es-RCA4 RCM que se descargaron de la web del proyecto CORDEX Regional (Coordinated Climate, http://www.cordex.org/). Las salidas del modelo global MOHC HadGEM2-Es, ejecutado dentro del provecto Climate Model Program of Diagnosis and Intercomparison (CMIP5) (https://esgfnode.llnl.gov/projects/cmip5/), se utilizaron como condiciones de transporte (salinidad y temperatura) en la frontera oceánica abierta y como condiciones iniciales.

El modelo Delft3D-Flow se ejecutó para los meses de julio y agosto de los periodos histórico (1999-2018) y futuro (2080-2099) bajo el escenario RCP4.5.

2.3. Índice de confort

El índice de confort indica el porcentaje de tiempo durante el cual la temperatura del agua permanece dentro del rango óptimo de tolerancia térmica de la especie estudiada (Des et al. 2020a). La determinación de los rangos óptimos de tolerancia se llevó a cabo mediante revisión bibliográfica. Siendo los rangos de temperatura óptima para las especies analizadas entre: 18-24 °C para *R. decussatus* (Macho et al., 2016; https://longline.co.uk/meta/List); 17-25 °C para *C. edule* (Compton et al., 2007; Verdelhos et al., 2015); 20-22 °C para *R. philippinarum* (Cerviño-Otero, 2011; Albentosa et al., 1994); y 15-20 °C para *V. corrugata* (Macho et al., 2016; https://longline.co.uk/meta/List).

2.4. Procesado de datos

En este estudio se utilizaron las salidas modelo Delft3D-Flow del correspondientes a la temperatura del agua de la capa 16, que corresponden con temperatura del agua en el fondo. El índice de confort para cada una de las especies bajo los diferentes escenarios se calculó a partir del valor promedio diario de la temperatura del agua en el fondo. Los resultados se representaron en forma de mapas de confort térmico. Además, se calculó la diferencia entre el índice de confort calculado bajo el escenario futuro respecto al histórico.

Para evaluar los posibles efectos del cambio climático en áreas cultivables, zonas donde la profundidad es menor a 10 m (Domínguez et al., 2021), se calculó la extensión de las zonas donde el índice de confort obtenido supera el 60% y la profundidad es menor a 10 m.

3. Resultados

3.1. Ruditapes decussatus

Durante el periodo histórico (figura 2a) el índice de confort obtenido para la especie *R. decussatus* supera el 60% en las zonas someras de la parte interna de las Rías de Muros, Arousa y Vigo, llegando a superar el 80% en A2 y en pequeñas extensiones de A1, M1 y V1.

Las proyecciones indican que, a finales de siglo bajo el escenario RCP4.5 (figura 2b) el área donde el confort podría ser superior al 60% podría verse incrementada, superando el 80% en amplias zonas de la parte interna de la Ría de Arousa y en algunas áreas de las rías de Muros y Vigo como M1, y V1. Además, se proyecta un desplazamiento de las áreas de confort hacia zonas más profundas (figuras 2a-b).

El análisis de la diferencia entre el índice de confort a finales de siglo y el índice de confort para el periodo histórico (figura 2c) indica un posible incremento generalizado de las áreas de confort para *R. decussatus*, aunque se proyecta un descenso del índice de confort en las zonas más someras de las rías de Muros y Arousa y Vigo pudiendo reducirse hasta un 50% (figura 2c) situándose el índice de confort en valores inferiores al 60% (figura 2b).



Fig. 2. Porcentaje de tiempo (julio-agosto) durante el cual la temperatura del agua en el fondo está dentro del rango de confort de *R. decussatus* (18-24°C), (a) histórico (1999-2018), (b) futuro (2080-2099), bajo el escenario RCP4.5, (c) diferencia (RCP4.5-Histórico), (d) áreas de cultivo actuales de la especie. La línea roja en a-c representa la batimétrica de 10 m.

En relación al área cultivable, que es el área donde la profundidad es menor a 10 m y el índice de confort supera el 60 %, se obtuvo una extensión total para las Rías Baixas de 57,60 km² para el periodo histórico (Tabla 1). En el futuro se espera que esta extensión se vea incrementada a 100,50 km². De las cuatro rías, la Ría de Arousa es en la que se obtuvo una mayor extensión tanto para el período histórico (38,03 km²) como para el futuro (58,63 km²).

Ría	Área (km²)	
	Н	RCP4.5
Muros	7,15	8,73
Arousa	38,03	58,63
Pontevedra	0,24	2,51
Vigo	12,17	14,53
Total	57 60	100 50

TABLA 1. Extensión del área (km²) para R. decussatus.

3.2. Venerupis corrugata

Para la especie V. corrugata los resultados obtenidos al analizar el periodo histórico indican aue 1a temperatura del agua en el fondo se sitúa dentro del rango de temperatura óptima más del 60% del tiempo (índice de confort > 60%) en grandes áreas de las Rías Baixas donde la profundidad es menor de 10 m, y en algunas zonas más profundas en las rías de Arousa y Vigo (figura 3a). En zonas costeras al norte y sur de las rías de Arousa y Vigo, y en algunas áreas como A3, V1 y P1 el índice de confort sobrepasa el 80%.

A finales de siglo (figura 3b), el área donde el confort podría superar el 60% del tiempo bajo condiciones de confort cubre prácticamente toda la extensión de las Rías Baixas, excepto las zonas más someras. En las partes medias y externas el índice de confort podría superar el 80%. En comparación con el escenario histórico (figura 3a), se observa que las áreas de confort podrían verse desplazadas hacia zonas más profundas (figura 3b).

El análisis de la diferencia entre el escenario RCP4.5 y el periodo histórico (figura 3c) muestra un posible aumento de las áreas de confort en zonas costeras de las rías de Muros y Pontevedra de entre un 50 y 75%. Sin embargo, se proyecta una disminución del índice de confort en las zonas someras de las cuatro rías, pudiendo reducirse el índice de confort hasta un 50% (figura 3c) lo que implicaría que en estas zonas el porcentaje de tiempo durante el cual la temperatura del agua se encuentra dentro de los valores óptimos para el crecimiento de V. corrugata sea inferior 60% (figura 3bc). La Ría de al Pontevedra, es la única de las cuatro rías en la que las proyecciones indican que se podría superar el 60% del tiempo bajo condiciones de confort en la parte interna (figura 3b).

En el periodo histórico los resultados indican que la extensión total de área cultivable para las cuatro rías es de 92,20 km². Las proyecciones indican que a finales de siglo bajo esta extensión será ligeramente menor (90,73 km²). La mayor extensión de área cultivable se obtuvo para la Ría de Arousa en los dos periodos (escenario histórico 63,50 km² y futuro RCP4.5 55,63 km²).

Ría	Área (km²)		
	Н	RCP4.5	
Muros	7,34	14,39	
Arousa	63,50	55,80	
Pontevedra	5,63	6,49	
Vigo	15,72	14,05	
Total	92.20	90.73	

TABLA 2. Extensión del área (km²) para V. corrugata.



Fig. 3. Porcentaje de tiempo (julio-agosto) durante el cual la temperatura del agua en el fondo está dentro del rango de confort de *V. corrugata* (15-20 °C), (a) histórico (1999-2018), (b) futuro RCP4.5 (2080-2099), bajo el escenario RCP4.5, (c) diferencia (RCP4.5-Histórico), (d) áreas de cultivo actuales de la especie. La línea roja en a-c representa la batimétrica de 10 m

3.3. Cerastoderma edule

Durante el período histórico, el índice de confort calculado para *C. edule* supera el 60% en las zonas someras de la parte interna de las Rías de Muros, Arousa y Vigo, llegando a superar el 80% en grandes áreas de estas zonas (figura 4a).

En el futuro, bajo el escenario RCP4.5 (figura 4b), se proyecta un incremento del área donde el índice de confort podría superar el 60%, llegando a superar el 80% en amplias zonas de la parte interna y las costas norte y sur de las rías de Arousa y Vigo.

En comparación con el escenario histórico (figura 4a), se observa un posible desplazamiento de las áreas de confort hacia zonas más profundas (figura 4b).

El análisis de la diferencia entre el escenario RCP4.5 y el periodo histórico (figura 4c) indica un probable incremento generalizado de las áreas de confort para *C. edule*. Por el contrario, se proyecta un posible descenso del índice de confort en las zonas someras de las rías de Muros, Arousa y Vigo, de hasta un 25%, lo que conllevaría a valores de confort inferiores al 60% en algunas regiones (A4 y V1, figura 4b).

Para el periodo histórico se obtuvo una extensión de área cultivable para el conjunto de las Rías Baixas de 83,72 km² (Tabla 3). En el futuro se espera que esta extensión aumente bajo el escenario RCP4.5 (135,50 km²). De las cuatro rías, la mayor extensión cultivable se observa en la Ría de Arousa en los dos periodos (escenario histórico 56,51 km² y futuro RCP4.5 89,84 km²).

Día	Área (km ²)		
Kla	Н	RCP4.5	
Muros	10,44	12,69	
Arousa	56,51	92,31	
Pontevedra	0,91	5,63	
Vigo	15,86	24,87	
Total	83,72	135,50	
TABLA 3 Extensión del área (km ²) para C			

TABLA 3. Extensión del área (km²) para C. edule.

3.4. Ruditapes philippinarum

El índice de confort obtenido durante los meses de julio y agosto para R. philippinarum tanto para el periodo histórico como futuro es inferior al 60% en las cuatro rías (figura 5a-b). Por lo tanto, no se observa ninguna región cultivable en la zona de estudio donde el índice de confort supere el 60% para esta especie durante los meses de El análisis de la diferencia verano. entre el escenario RCP4.5 y el periodo histórico (figura 5c) indica un posible incremento generalizado de las condiciones de confort para *R*. philippinarum. Sin embargo, se observa una posible disminución del índice de confort en las zonas someras de las rías de Muros, Arousa y Vigo.



Fig. 4. Porcentaje de tiempo (julio-agosto) durante el cual la temperatura del agua en el fondo está dentro del rango de confort de *C. edule* (17-25 °C), (a) histórico (1999-2018), (b) futuro (2080-2099), bajo el escenario RCP4.5, (c) diferencia (RCP4.5-Histórico), (d) áreas de cultivo actuales de la especie. La línea roja en a-c representa la batimétrica de 10 m.



Fig. 5. Porcentaje de tiempo (julio-agosto) durante el cual la temperatura del agua en el fondo está dentro del rango de confort de *R. philippinarum* (20-22 °C), (a) histórico (1999-2018), (b) futuro (2080-2099), bajo el escenario RCP4.5, (c) diferencia (RCP4.5-Histórico), (d) áreas de cultivo actuales de la especie. La línea roja en a-c representa la batimétrica de 10 m.

4. Discusión

La comparación entre la distribución geográfica de las áreas de confort proyectadas a finales de siglo y las modeladas para el periodo histórico permite determinar como el cambio climático, bajo el escenario RCP4.5, podría afectar a las especies *R. decussatus, R. philippinarum, C. edule* y *V. corrugata* en las Rías Baixas.

Durante el periodo histórico, las áreas de mayor confort para R. decussatus, C. *edule* y V. *corrugata* se localizan en la parte interna de las rías y en zonas con profundidades menores de 10 m. Sin embargo, a finales de siglo y bajo el escenario futuro RCP4.5, el área de confort de las cuatro especies podría verse incrementada desplazándose hacia zonas más externas y profundas de las rías. Para R.philippinarum, cuyo rango de temperatura óptimo se sitúa entre 20 °C y 22 °C, no se han encontrado áreas donde el índice de confort sea superior al 60%. Esto podría deberse al alto valor de temperatura como límite inferior y a la escasa amplitud del rango de temperatura óptima. Al ser la zona de estudio un área afectada por eventos de afloramiento la temperatura del agua de fondo varía ligada a estos eventos por lo que en escasas ocasiones la temperatura se mantiene dentro de un rango tan restringido.

En la NOPI, los eventos de afloramiento son frecuentes durante los meses de estudio, propiciando la entrada de agua fría en las rías. La temperatura media del agua en el fondo durante la época de afloramiento se sitúa entre los 12 y los 14 °C en la parte intermedia y externa (Prego et al., 2001; Álvarez et al., 2005). Estos valores son inferiores al rango óptimo inferior de las cuatro especies, lo que sustenta que el índice de confort obtenido para las especies sea inferior al 60% en la mayor parte del área de estudio. El incremento de temperatura proyectado para finales de siglo apoya los resultados obtenidos en este estudio, va que la temperatura del agua en el fondo podría aumentar hasta superar el rango inferior de especies como V. corrugata (15 °C) y C. edule (17 °C) en la mayor parte de las rías. En cambio, los resultados indican que el límite inferior de *R. decussatus* (18°C) solo se superaría en la parte más interna de las rías. Este patrón de temperaturas, mayor en la parte interna que en la externa, ha sido previamente detectado v analizado en estudios de efectos del cambio climático en fanerógamas (Valle et al., 2014), Mytilus galloprovincialis (Silva et al., 2017; Des et al., 2020a) y macroalgas (Des et al., 2020b), determinando que las zonas someras de las partes internas de las rías podrían sufrir un mayor impacto del aumento de la temperatura del agua.

Como se indicó previamente, las zonas de confort superior al 60% para R. decussatus, C. edule y V. corrugata se observaron en la parte interna y somera de las cuatro rías durante el periodo histórico, donde la temperatura del agua en el fondo se encuentra dentro del rango óptimo al menos el 60% del tiempo. Sin embargo, en el escenario futuro, el calentamiento oceánico podría propiciar que la temperatura en algunas de estas zonas supere el límite superior de las especies (V. corrugata 20 °C, R. philippinarum 22 °C, R. decussatus 24 °C y C. edule 25°C) la mayor parte del tiempo, reduciéndose el confort debido al estrés térmico.

Los contrastes de temperatura del agua de fondo observados entre las zonas externas e internas de las rías para ambos periodos estudiados podrían deberse a distintos fenómenos físicos. En verano, la predominancia de vientos del norte y la orientación de la costa

gallega favorecen el afloramiento de agua profunda más fría en las rías (Álvarez et al., 2005; Rosón et al., 2008). El agua aflorada podría mitigar el efecto del aumento de temperatura en las capas más profundas y la parte externa de las rías motivando el contraste de temperatura respecto a zonas internas (Des et al., 2020a). En cambio, en el futuro se espera que la temperatura del agua aflorada aumente (Casabella et al., 2014; Sousa et al., 2017), aumentando la temperatura media del agua de fondo. Además, a pesar de la intensificación de los vientos favorables al afloramiento prevista (Sousa et al., 2017), el incremento de la estratificación térmica y la. profundización de la termoclina podrían contrarrestar el aumento del índice de afloramiento (Sousa et al., 2020). Las provecciones indican que a finales de siglo la estratificación podría ser mayor (Sousa et al., 2020; Des et al., 2020a) dificultando el ascenso del agua la mezcla vertical, y aflorada y favoreciendo el contraste de temperatura entre zonas externas e internas. La radiación solar es otro motiva factor que las elevadas temperaturas del agua de fondo en zonas someras de las partes internas de las rías la estratificación. El y calentamiento progresivo de la superficie por la máxima influencia solar genera un gradiente vertical de temperatura hasta las capas del fondo (Álvarez et al., 2005).

Las diferencias entre el índice de confort obtenido para cada una de las rías pueden deberse a las diferencias en la circulación general y la fisiografía (Álvarez-Salgado et al., 1993; Taboada et al., 1998). A pesar de que la circulación general de las rías de Vigo y Pontevedra sigue un patrón similar, las diferencias fisiográficas en la parte interna de ambas rías propicia valores diferentes de la temperatura del agua. En la parte interna de la Ría de Vigo se encuentra la bahía de San Simón (V1), una zona somera, mayoritariamente intermareal, de baja energía, y separada del resto de la ría por el estrecho de Rande (Iglesias y García Gil, 2007). En esta zona la radiación solar propia de los meses de verano (Álvarez et al., 2005) estaría favoreciendo el aumento de la temperatura del agua en toda la columna. En Pontevedra, en cambio, las zonas intermareales son escasas y la profundidad en la parte interna es mayor que en la Ría de Vigo. Esto favorece que toda la ría esté más afectada por el afloramiento (Prego et al., 2001) y que los valores de la temperatura del agua de fondo en la parte interna de la Ría de Pontevedra sean similares a la del agua aflorada. La circulación en la Ría de Arousa es diferente al resto de las rías, el agua aflorada apenas entra en la ría debido a su orientación geográfica (dirección noreste-suroeste) y la entrada de agua aflorada tan solo ocurre por la boca sur (Álvarez et al., 2005). El caso de la Ría de Muros, la circulación general es similar a la de Vigo y Pontevedra con la particularidad de que es la única ría sin islas en su boca por lo que se encuentra más afectada por la circulación oceánica (Carballo et al., 2009a, 2009b).

El posible aumento de las zonas de confort térmico para las especies analizadas no implicaría que todas las áreas puedan ser explotadas, ya que el cultivo de estas especies se limita a zonas de hasta 10 m de profundidad (Domínguez et al., 2021). El análisis de las áreas cultivables reflejó que la extensión de estas zonas donde el índice de confort proyectado es superior, podría aumentar de forma generalizada para R. decussatus y C. edule a finales de siglo. Para R. phlippinarum no se contempló ninguna región con respecto a ambos periodos que reúna condiciones de confort para el cultivo de la especie

durante los meses de estudio. Lo que sugiere que tanto en la actualidad como a finales de siglo la totalidad de las áreas de cultivo se encontrarían bajo condiciones de estrés térmico para R. philippinarum durante los meses de verano. Por otro lado, V. corrugata es la única especie para la cual la extensión de área cultivable podría disminuir. La gran relevancia económica de estas cuatro especies en Galicia se ha incrementado en los últimos años moviendo aproximadamente 71 y 74 millones de euros en los años 2018 y 2019 (www.pescasgalicia.com). Los resultados obtenidos indican que para finales de siglo la productividad de R. decussatus y C. edule podría verse incrementada mientras que la de V. corrugata y R. philippinarum podría disminuir.

A pesar de que las especies analizadas son capaces de adaptarse al estrés térmico mediante mecanismos fisiológicos desarrollando pautas de comportamiento (p. ej.: enterramiento, cierre de valvas), la exposición a temperaturas fuera del rango óptimo de desarrollo repercuten en la fisiología de los bivalvos alterando las tasas de crecimiento, alimentación la У capacidad de enterramiento y cierre de valvas y, en última instancia. provocando la muerte de los individuos (Sobral y Widdows, 1997; Verdelhos et al., 2015). Domínguez et al. (2021) analizaron el impacto del estrés térmico las cuatro especies estudiadas, en concluyendo que V. corrugata es la especie más susceptible al estrés térmico, seguida de C. edule, R. philippinarum y R. decussatus. Esto indica que la capacidad adaptativa de V. corrugata (cuya productividad podría disminuir a final de siglo debido al estrés térmico) podría ser limitada.

Estudios bajo condiciones de laboratorio indican que valores de

temperatura del agua superiores a 25 °C causan reducciones en el margen de crecimiento en las cuatro especies analizadas (Albentosa et al., 1994; Sobral y Widdows 1997; Verdelhos et al., 2015). Este valor podría alcanzarse e incluso sobrepasarse en muchas zonas internas de las Rías Baixas bajo el escenario RCP4.5. Por lo tanto, el aumento prolongado de exposición al estrés térmico en muchas de las zonas internas de las rías se traduciría en un aumento de la frecuencia de enterramiento y una tendencia negativa en el crecimiento siendo necesario más tiempo para que los individuos alcancen el tamaño comercial (Molares et al., 2008; Macho et al., 2016).

También es importante destacar que, durante los meses de julio y agosto, las cuatro especies estudiadas se encuentran en época de puesta y el posible estrés térmico podría traducirse en una disminución del éxito reproductivo debido a un menor número y tamaño de huevos (Cerviño-Otero, 2011). los Además, las temperaturas elevadas aumentan la prevalencia e intensidad de la infección del principal parásito que almejas afecta а las analizadas (Perkinsus olseni) y, aunque no causa altas tasas de mortalidad en el campo (Aranguren et al., 2011), su prevalencia podría aumentar en el futuro.

Conclusiones

El objetivo principal del trabajo es estudiar los posibles impactos del cambio climático y, en particular, del aumento de la temperatura del océano, sobre las especies de alto valor socioeconómico Cerastoderma edule, *Ruditapes* decussatus, Venerupis *corrugata* y *Ruditapes philippinarum* en las Rías Baixas. Para ello se simuló la hidrodinámica de estos estuarios durante los meses de julio y agosto del periodo histórico (1999-2018) y futuro

(2080-2099) bajo el escenario de emisiones de efecto invernadero RCP 4.5 utilizando el modelo numérico Delft3D-Flow. Utilizando las salidas de temperatura del agua en el fondo se calculó el índice de confort para cada especie y se realizaron mapas mostrando la distribución geográfica de las áreas de confort, lo que ha permitido extraer las siguientes conclusiones:

- Durante el periodo histórico, las áreas donde el índice de confort para *R. decussatus, C. edule* v V. supera el corrugata 60% se encuentran en las zonas internas de las cuatro rías y en zonas con profundidades menores de 10 m. Ruditapes philippinarum es la única especie para la que no se observan áreas donde el índice de confort supere el 60%.
- De forma general, el área de confort de las cuatro especies podría aumentar bajo el escenario futuro RCP4.5.
- En las zonas internas y someras de las rías el calentamiento oceánico podría impactar negativamente en la productividad de las especies analizadas, ya que se proyecta una disminución del índice de confort en estas áreas. Esta disminución se debe a que la temperatura del agua del fondo podría sobrepasar el límite superior del rango óptimo de las especies.
- El calentamiento oceánico podría incrementar la productividad de las especies analizadas en las zonas externas y cerca del límite de profundidad máxima para el cultivo (10 m), al situarse la temperatura dentro del rango óptimo.

Referencias

Albentosa, M., Beiras, R., & Camacho,A. P. (1994). Determination of optimal thermal conditions for

growth of clam (Venerupis pullastra) seed. Aquaculture, 126(3-4), 315-328.

- Álvarez-Salgado, X. A., Rosón, G., Pérez, F. F., & Pazos, Y. (1993). Hydrographic variability off the Rías Baixas (NW Spain) during the upwelling season. Journal of Geophysical Research: Oceans, 98(C8), 14447-14455.
- Álvarez, deCastro. I.. М.. Gomez-Gesteira, M., & Prego, R. intraannual (2005).Inter-and analysis of the salinity and temperature evolution in the Galician Rías Baixas-ocean boundary of (northwest Spain). Journal Geophysical Research: Oceans. 110(C4).
- Aranguren, R., Poisa-Beiro, L.,
 Villalba, A., & Figueras, A., (2011)
 Maretiliosis en moluscos.
 In:Figueras A, Novoa B (eds)
 Enfermedades de moluscos bivalvos de interés en acuicultura. Fundación
 Observatorio Español de Acuicultura, Madrid, p 245–282.
- Carballo, R., Iglesias, G., & Castro, A. (2009a). Residual circulation in the Ria de Muros (NW Spain): a 3D numerical model study. Journal of Marine Systems, 75(1-2), 116-130.
- Carballo, R., Iglesias, G., & Castro, A. (2009b). Baroclinic model study of the marine current energy potential in the Ria de Muros (NW Spain). In Coastal Engineering 2008: (In 5 Volumes) (pp. 4658-4664).
- Casabella, N., Lorenzo, M. N., & Taboada, J. J. (2014). Trends of the Galician upwelling in the context of climate and hange. Journal of sea research, 93, 23-27.
- Cerviño-Otero, A. (2011). Ciclo reproductivo, cultivo en criadero y en el medio natural de la almeja babosa Venerupis pullastra (Montagu, 1803) (Doctoral dissertation, Universidad de Santiago de Compostela).

- Compton, T. J., Rijkenberg, M. J., Drent, J., & Piersma, T. (2007). Thermal tolerance ranges and climate variability: a comparison between bivalves from differingclimates. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 352(1), 200-211.
- Des, M., deCastro, M., Sousa, M. C., Dias, J. M., & Gómez-Gesteira, M., (2019). Hydrodynamics of river plume intrusion into an adjacent estuary: the Minho River and Ria de Vigo. Journal of Marine Systems, 189, 87–97.
- Des, M. (2020). Hydrodynamics of NW Iberian Peninsula under past and future climate conditions (Tesis doctoral, Universidade de Vigo, 169).
- Des, M., Gómez-Gesteira, M., deCastro, M., Gómez-Gesteira, L., & Sousa, M. C. (2020a). How can ocean warming at the NW Iberian Peninsula affect mussel aquaculture?. Science of The Total Environment, 709, 136117.
- Des, M., Martínez, B., DeCastro, M., Viejo, R. M., Sousa, M. C., & Gómez-Gesteira, M. (2020b). The impact of climate change on the geographical distribution of habitatforming macroalgae in the Rías Baixas. Marine Environmental Research, 161, 105074.
- Domínguez, R., Olabarria, C., Woodin, S. A., Wethey, D. S., Peteiro, L. G., Macho, G., & Vázquez, E. (2021).
 Contrasting responsiveness of four ecologically and economically important bivalves to simulated heat waves. Marine Environmental Research, 164, 105229.
- Doney, S. C., Ruckelshaus, M., Emmett
 Duffy, J., Barry, J. P., Chan, F.,
 English, C. A., Galindo, H.M.,
 Grebmeier, J.M., Hollowed, A.B.,
 Knowlton, N., Polovina, J., Rabalais,
 N.N., Sydeman, W.J., & Talley, L.
 D. (2012). Climate change impacts

on marine ecosystems. Annual review of marine science, 4, 11-37.

- Estrada, F., Guerrero, V. M., & Gay, C. (2010). Una nueva metodología para realizar downscaling estadístico y para la estimación de impactos potenciales de cambio climático en el consumo de energía en las ciudades. Asociación Española de Fernández Climatología. García, Felipe; Galán Gallego, Encarna; Cañada Torrecilla, Rosa (eds.). Barcelona: Serbal, 2010, p. 73-82.
- Iglesias, J., & García-Gil, S. (2007). High-resolution mapping of shallow gas accumulations and gas seeps in San Simón Bay (Ría de Vigo, NW Spain). Some quantitative data. Geo-Marine Letters, 27(2), 103-114.
- Macho, G., Woodin, S. A., Wethey, D.
 S., & Vázquez, E. (2016). Impacts of sublethal and lethal high temperatures on clams exploited in European fisheries. Journal of Shellfish Research, 35(2), 405-419.
- McGuffie, K., & Henderson-Sellers, A. (2014). The climate modelling primer. John Wiley & Sons.
- Meehl, G. A., Stocker, T. F., Collins, W. D., Friedlingstein, P., Gaye, A. T., Gregory, J. M., Kitoh, A., Knutti, R., Murphy, J.M., Noda, A., Raper, S.C.B., Watterson, A.J., & Zhao, Z. C. (2007). Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 32, 10013-2473.
- Molares, J., Parada, J. M., Navarro-Pérez, E., & Fernández, A. (2008). Variabilidad interanual de las ventas de los principales recursos marisqueros de Galicia y su relación con las condiciones ambientales. Rev Gal Rec Mar, 2, 1-42.
- Nilawar, A. P., & Waikar, M. L. (2019). Impacts of climate change on streamflow and sediment

concentration under RCP 4.5 and 8.5: A case study in Purna river basin, India. Science of the total environment, 650, 2685-2696.

- Peleteiro, J. B., Trujillo, V., Díaz, R. B., Ribó, J., Olmedo, M., Blázquez, B.
 Á., Rodríguez, J., Pazó, J., & Otero, J. J. (2008). Explotación: pesca, marisqueo y acuicultura en la ría de Vigo. In La Ría de Vigo: una aproximación integral al ecosistema marino de la Ría de Vigo (pp. 257-323). Instituto de Estudios Vigueses.
- Prego, R., & Fraga, F. (1992). A simple model to calculate the residual flows in a Spanish ria. Hydrographic consequences in the ria of Vigo. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 34(6), 603-615.
- Prego, R., Dale, A. W., Decastro, M., Gómez-Gesteira, M., Taboada, J. J., Montero, P., Villareal, M. R., & Pérez-Villar, V. (2001).
 Hydrography of the Pontevedra Ria: Intra-annual spatial and temporal variability in a Galician coastal system (NW Spain). Journal of Geophysical Research: Oceans, 106(C9), 19845-19857.
- Rosón, G., Cabanas, J. M., & Pérez, F. F. (2008). Hidrografía y dinámica de la Ría de Vigo: un sistema de afloramiento.
- Silva, A. F., Sousa, M. C., Bernardes, C., & Dias, J. M. (2017). Will climate change endangers the current mussel production in the Rias Baixas (Galicia, Spain)?. J Aquac Fisheries, 1(001).
- Sobral, P., & Widdows, J. (1997). Effects of elevated temperatures on the scope for growth and resistance to air exposure of the clam Ruditapes decussatus (L.), from southern Portugal. Marine Pollution Bulletin, 34(12), 992-1000..
- Sousa, M. C., Vaz, N., Álvarez, I., Gomez-Gesteira, M., & Dias, J. M. (2014). Modeling the Minho River plume intrusion into the rias Baixas

(NW Iberian Peninsula). Continental Shelf Research, 85, 30-41.z.

- Sousa, M. C., deCastro, M., Álvarez, I., Gomez-Gesteira, M., Dias, J. M., (2017). Why coastal upwelling is expected to increase along the western Iberian Peninsula over the next century? Sci. Total Environ. 592, 243–251.
- Sousa, M. C., Ribeiro, A., Des, M., Gomez-Gesteira, M., deCastro, M., & Dias, J. M. (2020). NW Iberian Peninsula coastal upwelling future weakening: Competition between wind intensification and surface heating. Science of the Total Environment, 703, 134808.
- Taboada, J. J., Prego, R., Ruiz-Villarreal, M., Gómez-Gesteira, M., Montero, P., Santos, A. P., & Pérez-Villar, V. (1998). Evaluation of the seasonal variations in the residual circulation in the R1a of Vigo (NW Spain) by means of a 3D Baroclinic model. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 47(5), 661-670.
- Valle, M., Chust, G., del Campo, A., Wisz, M. S., Olsen, S. M., Garmendia, J. M., & Borja, Á. (2014). Projecting future distribution of the seagrass Zostera noltii under global warming and sea level rise. Biological Conservation, 170, 74-85.
- Verdelhos, T., Marques, J. C., & Anastácio, P. (2015). Behavioral and mortality responses of the bivalves Scrobicularia plana and Cerastoderma edule to temperature, as indicator of climate change's potential impacts. Ecological Indicators, 58, 95-103.
- Vilas, F., Bernabeu, A. M., & Méndez,
 G. (2005). Sediment distribution pattern in the Rias Baixas (NW Spain): main facies and hydrodynamic dependence. Journal of Marine Systems, 54(1-4), 261-276.

Análisis del recurso solar fotovoltaico *offshore* al oeste de la Península Ibérica

B. ARGUILÉ-PÉREZ*, X. COSTOYA, M. DECASTRO

*beatriz.arguile@alumnos.uvigo.es EPhysLab (Environmental Physics Laboratory), Facultade de Ciencias, Universidade de Vigo, Campus As Lagoas s/n, Ourense, Spain

RESUMEN

La mayor parte de las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera están a cargo del sector energético. Por esa razón, se busca encontrar fuentes de energía limpias y renovables que permitan reducir la quema de combustibles fósiles. Un ejemplo de energía renovable es la energía solar fotovoltaica, la cual ha tenido que hacer frente a problemas como la disponibilidad de terreno útil y la pérdida de eficiencia debido al calentamiento de los paneles solares. Para solucionar dichos problemas, se han realizado proyectos con el propósito de instalar paneles solares fotovoltaicos en el océano donde la disponibilidad de espacio no es un obstáculo y el contacto con el agua y las fuertes rachas de viento contribuyen a mejorar su eficiencia. En este sentido, el objetivo de este estudio es analizar el recurso solar fotovoltaico al oeste de la Península Ibérica y localizar la mejor zona para la instalación de paneles solares fotovoltaicos offshore. Además, se estudiará el cambio del recurso en el futuro, en un contexto de cambio climático, mediante datos de simulaciones realizadas con modelos climáticos regionales (EURO-CORDEX) bajo el escenario RCP8.5. Se calculará el recurso solar en el periodo histórico (1990-2019) y dos periodos futuros: uno cercano (2030-2059) y otro lejano (2070-2099). Mediante este estudio, se ha obtenido que el recurso solar varía latitudinalmente en la región con valores de ~160 Wm⁻² en el norte y ~210 Wm⁻² en el sur. Este recurso disminuirá en el futuro de forma generalizada (~ -0.5% en el futuro cercano y ~ -1.2% en el futuro lejano) como consecuencia del cambio climático. Tanto el análisis histórico como las proyecciones futuras indican que el Golfo de Cádiz es la mejor zona para la instalación de paneles solares fotovoltaicos offshore, ya que presenta el mayor recurso solar de la zona y una mayor estabilidad a lo largo de todo el año. Además, se prevé que la estabilidad del recurso aumente en esa región un 1.3% respecto al periodo histórico. Sin embargo, no deben descartarse otras regiones como Galicia, donde podrían instalarse parques híbridos en los que se combinen la energía solar fotovoltaica con la energía eólica haciendo que el recurso de energía renovable total sea mayor y más estable.

Palabras Clave: Energía solar fotovoltaica, energías renovables offshore, cambio climático, CORDEX, Península Ibérica.

1. Introducción

En el año 2010, la mayor parte de las emisiones de gases de efecto invernadero

a la atmósfera estuvieron a cargo del sector energético, con una contribución del 35% según el Quinto Informe de Evaluación del IPCC (AR5). Por esa razón, se hace cada vez más necesario encontrar fuentes de energía limpias y renovables que permitan reducir la quema de combustibles fósiles. Los gases de efecto invernadero de origen antropogénico que se han acumulado en la atmósfera entre los años 1951 y 2010 han provocado un calentamiento global de 0.9 °C, y se espera que el aumento de la temperatura global sea mayor a lo largo de todo el siglo XXI (IPCC, 2013). En el año 2018, la mayoría del consumo mundial de energía primaria estuvo a cargo del petróleo, el carbón y el gas natural, con un 33.6%, un 27.2% y un 23.9%, respectivamente, mientras que energías renovables las solo contribuyeron con un 10.8% (APPA Renovables, 2021a). En España, las energías renovables fueron la tercera fuente de energía mayoritaria, con un 13.9%, por detrás del petróleo y el gas natural, que contribuyeron con un 44.9% respectivamente 21.1%, (APPA y Renovables, 2021b) (Figura 1).



Fig. 1. Porcentaje de consumo de energía primaria (A) mundial, (B) en Europa y (C) en España en el año 2018 [modificado de APPA Renovables (2021a); APPA Renovables (2021b)].

Según Oliveira-Pinto y Stokkermans (2020), se espera que la demanda energética aumente un 28% entre 2015 y 2040. Estas cifras reflejan la gran necesidad que presenta la población

mundial de medidas buscar de mitigación del cambio climático. Tal y como se expone en el AR5, una de esas medidas es aumentar el uso de energías renovables. "De aquí a 2030, aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas" es una de las metas dentro del Objetivo 7 de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas (Naciones Unidas, 2015).

1.1. La energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica se obtiene del recurso natural conocido como "recurso solar fotovoltaico", que se define como la energía fotovoltaica por unidad de tiempo que producen los paneles solares por unidad de área. El recurso solar fotovoltaico depende principalmente de la radiación de onda incidente. corta aunque factores ambientales como el viento y la pueden temperatura afectar a la eficiencia de los paneles (Jerez et al., 2015). Con una capacidad instalada de unos 707 GW, la energía solar fotovoltaica es la tercera fuente de energía renovable mundial después de la eólica y la hidroeléctrica (Wu et al., 2019; IRENA, 2020), al igual que en España, con una capacidad de unos 11.8 GW.

Los principales retos a los que se enfrenta la tecnología fotovoltaica son, por un lado, mejorar la eficiencia de los paneles fotovoltaicos y, por otro, disponer de espacio suficiente para su instalación. La búsqueda de ideas para mejorar la eficiencia de las células fotovoltaicas es muy importante, sobre todo, en un contexto de calentamiento global, ya que cuanto mayor es la temperatura del aire circundante a las placas, menor es su eficiencia (Jerez et al., 2015; Golroodbari y van Sark, 2020; Soukissian et al., 2021). La solución a

estos problemas podría encontrarse en la energía solar fotovoltaica offshore. Ésta es una energía renovable novedosa, ya que no fue hasta el año 2014 cuando se instalaron primeros paneles los fotovoltaicos offshore, en las Maldivas (Soukissian et al., 2021). Desde entonces, a ese proyecto le siguieron algunos más, como el proyecto ya finalizado Zon op Zee (Solar-at-Sea), llevado a cabo por la empresa holandesa Oceans of Energy, que consta de dos plantas fotovoltaicas flotantes. Otro proyecto de energía solar fotovoltaica offshore es el Proyecto Saemangeum, en el estuario Saemangeum (mar Amarillo, Corea del Sur), el cual aúna la energía solar y la eólica offshore. En España, las compañías noruegas Ocean Sun y Fred. Olsen Renewables junto con otros colaboradores han lanzado un proyecto para instalar 0.25 MWp de potencia fotovoltaica flotante en las costas de Gran Canaria, que es la parte más soleada de Europa (Garanovic, 2021). La Figura 2 es un ejemplo de una planta solar fotovoltaica offshore en Kyrholmen (Noruega) (imagen cedida por Ocean Sun):



Fig. 2. Planta solar fotovoltaica *offshore* en Noruega (Garanovic, 2021).

Numerosos estudios como Oliveira-Pinto y Stokkermans (2020) o Golroodbari y van Sark (2020) señalan algunas ventajas que presentan los paneles fotovoltaicos *offshore* respecto a los paneles solares convencionales en tierra. Los paneles fotovoltaicos en el

océano permiten mejorar la eficiencia, puesto que el contacto con el agua reduce la temperatura de los paneles debido a la diferencia térmica entre el agua y el aire. Además, el viento es más intenso sobre la superficie del océano que en tierra (Golroodbari y van Sark, 2020), lo que favorece el enfriamiento de los paneles. En cuanto a la disponibilidad de espacio, la instalación de paneles en el océano evita eliminar áreas terrestres que pueden destinarse a otros recursos, como por ejemplo la agricultura. Otras ventajas de instalar paneles fotovoltaicos en el océano son la ausencia de sombra que bloquee la luz del sol, la menor cantidad de polvo que ensucie los paneles y que no se necesita de grandes obras para acondicionar el terreno (en tierra por ejemplo sería necesario allanar el terreno) (Golroodbari y van Sark, 2020; Oliveira-Pinto y Stokkermans, 2020). desventajas de la energía Como fotovoltaica offshore, Oliveira-Pinto y Stokkermans (2020)señalan que condiciones adversas de viento y oleaje pueden producir microfracturas en las células fotovoltaicas. Además. los paneles pueden sufrir corrosión por el agua de mar.

Uno de los principales obstáculos a los que se enfrenta la energía solar fotovoltaica es la intermitencia de los recursos, ya que no son estables a lo largo de todo el año (Jerez et al., 2015; López et al., 2020; Soukissian et al., 2021). Por esa razón, se ha estudiado la posibilidad de combinar distintas energías renovables en parques híbridos offshore, que permitan una producción de energía limpia, lo más estable posible, a lo largo de todo el año (López et al., 2020; Oliveira-Pinto et al., 2020; Soukissian et al., 2021).

1.2. Área de estudio

La zona de estudio abarca desde el estrecho de Gibraltar hasta el mar

Cantábrico, al norte (de 36°N a 44.25°N) y hasta aproximadamente el final de la plataforma continental de Portugal, al oeste (de 5.5°W a 10.75°W) (Figura 3).



Fig. 3. Batimetría de la región de estudio.

En frente de las costas de Viana do Castelo, en Portugal, las energías renovables en el océano va se están explotando comercialmente con parques flotantes, como la energía eólica offshore (Power Technology, 2020) y se espera un incremento de parques flotantes en la zona de estudio en el futuro, como un proyecto en Bilbao (España) que confía completarse en 2025 (Buljan, 2021). Según Sanz (2020), España y Portugal tienen un gran potencial para convertirse en "el centro de la energía eólica flotante", y cabe pensar que otras formas de energía renovables como la solar fotovoltaica offshore puedan explotarse en solitario o combinarse con la eólica en muchas regiones, para garantizar un mayor suministro energético limpio y más estable a lo largo del año. En la Figura 3 puede observarse que la plataforma continental es estrecha, lo que podría condicionar la instalación de parques eólicos y solares fotovoltaicos. Sin embargo, gracias a los avances tecnológicos aue existen en 1a actualidad, puede superarse el problema de una plataforma continental estrecha mediante estructuras flotantes (Williams, 2020).

1.3. Objetivos

El principal objetivo de este estudio es conocer el recurso solar fotovoltaico sobre el océano Atlántico, al oeste de la Península Ibérica. Así, se analizará:

- el recurso solar fotovoltaico offshore en términos anuales y estacionales,
- el impacto que tendrá el cambio climático sobre este recurso en el futuro y
- los cambios en la estabilidad del recurso a lo largo del año.

También se estudiarán las variables atmosféricas de las que depende el recurso solar por separado, para poder explicar los cambios en el recurso solar fotovoltaico.

El análisis de todos estos aspectos tiene como finalidad discutir cuál será la mejor localización para posibles proyectos de energía solar fotovoltaica *offshore* en esta región. Para ello se utilizarán datos de simulaciones futuras realizadas con modelos climáticos regionales bajo el escenario RCP8.5. Se calculará el recurso solar en un periodo histórico (1990-2019) y dos periodos futuros: uno cercano (2030-2059) y otro lejano (2070-2099).

2. Bases de datos y métodos

2.1. Bases de datos utilizadas

Para poder calcular el recurso solar fotovoltaico se han utilizado tres variables: la radiación de onda corta incidente sobre la superficie de la Tierra, la temperatura del aire a 2 metros de altura y la velocidad del viento a 10 metros de altura. Se han seleccionado tres periodos temporales para estudiar el valor de estas variables en el pasado y sus proyecciones futuras. Como periodo de referencia se han seleccionado las tres décadas comprendidas entre 1990 y 2019. Por otro lado, se ha seleccionado un futuro cercano (2030-2059) y un futuro lejano (2070-2099), ya que se espera un auge de la energía solar fotovoltaica de aquí a 10 años e interesa estudiar su comportamiento a largo plazo.

Los datos son resultado de simulaciones llevadas a cabo por varios institutos dentro del Experimento Coordinado del Clima Reducido a Escala Regional (COordinated Regional climate Downscaling Experiment, CORDEX). CORDEX (https://cordex.org/) toma las salidas de los Modelos Climáticos Globales (Global Climate Models, GCM), con escalas espaciales de alrededor de 1000 km × 1000 km, para Modelos alimentar los Climáticos Regionales (Regional Climate Models, RCM). En este estudio se ha trabajado con el dominio EUR-11, dentro de la rama europea de CORDEX, EURO-CORDEX (Benestad et al., 2021), con una resolución espacial de 0.11°× 0.11°(~12.5 km). Los datos pueden descargarse https://esgfen data.dkrz.de/search/cordex-dkrz/. Se buscan modelos regionales que cumplan tres requisitos: disponer de datos de las tres variables bajo consideración, una resolución temporal diaria y que las proyecciones futuras se hayan realizado escenario de forzamiento baio el radiativo más pesimista, el RCP8.5. En total se han encontrado 35 modelos regionales que disponen de datos para las tres variables, y que además cumplen las condiciones de resolución espaciotemporal y de forzamiento radiativo en el futuro bajo interés. Dichos modelos se muestran en la Tabla 1.

Para validar las 35 simulaciones descritas en la Tabla 1 para la región de estudio se utilizará la base de datos ERA5 del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*, ECMWF), para el periodo (1986-2005). Los datos de ERA5 pueden descargarse en https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp #!/dataset/reanalysis-era5-single-

<u>levels?tab=overview</u>. Son datos horarios con una resolución espacial de $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$.

2.2. Métodos

2.2.1. Cálculo del recurso solar fotovoltaico.

El cálculo del recurso solar fotovoltaico (PV) está basado en el artículo de Jerez et al. (2015). El recurso solar fotovoltaico depende de dos factores: la radiación incidente de onda corta, *RAD*, y de la relación de calidad, *P*_R:

$$PV = P_R(t) \cdot RAD(t) \tag{1}$$

La relación de calidad P_R describe la relación entre la potencia real que producen los paneles fotovoltaicos y la potencia teórica (Solanki et al., 2017), y está afectada por la temperatura del panel de la célula fotovoltaica, T_{cel} :

$$P_R(t) = 1 + \gamma [T_{cel}(t) - T_{STC}] \qquad (2)$$

El coeficiente $\gamma = -0.005^{\circ}C^{-1}$ es la eficiencia de conversión de una célula solar de silicio cristalino (Tonui y Tripanagnostopoulos, 2008) y $T_{STC} =$ 25°C es la temperatura en condiciones de prueba estándar. Nótese que el factor γ . de signo negativo, indica que la relación de calidad de un panel fotovoltaico disminuye al aumentar la temperatura de la célula fotovoltaica. La temperatura del panel fotovoltaico, a su vez, se ve influenciada por factores ambientales como la temperatura del aire (T), la velocidad del viento (W) y la propia radiación solar (RAD), tal y como describen Chenni et al. (2007) con la ecuación (3):

$$T_{cel}(t) = c_1 + c_2 \cdot T(t) + c_3 \cdot RAD(t) + c_4 \cdot W(t)$$
(3)

Número de modelo	MCG	MCR	Instituto
1	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	CCLM4-8-17	CLMcom
2	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	ALADIN63	CNRM
3	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	HIRHAM5	DMI
4	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	REMO2015	GERICS
5	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	WRF381P	IPSL
6	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	RACMO22E	KNMI
7	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	RCA4	SMHI
8	ICHEC-EC-EARTH	HIRHAM5	DMI
9	ICHEC-EC-EARTH	RACMO22E	KNMI
10	ICHEC-EC-EARTH	RCA4	SMHI
11	IPSL-IPSL-CM5A-MR	REMO2015	GERICS
12	IPSL-IPSL-CM5A-MR	WRF381P	IPSL
13	IPSL-IPSL-CM5A-MR	RACMO22E	KNMI
14	IPSL-IPSL-CM5A-MR	RCA4	SMHI
15	MOHC-HadGEM2-ES	CCLM4-8-17	CLMcom
16	MOHC-HadGEM2-ES	COSMO-crCLIM-v1-1	CLMcom-ETH
17	MOHC-HadGEM2-ES	ALADIN63	CNRM
18	MOHC-HadGEM2-ES	RegCM4-6	ICTP
19	MOHC-HadGEM2-ES	WRF381P	IPSL
20	MOHC-HadGEM2-ES	RACMO22E	KNMI
21	MOHC-HadGEM2-ES	RCA4	SMHI
22	MPI-M-MPI-ESM-LR	CCLM4-8-17	CLMcom
23	MPI-M-MPI-ESM-LR	COSMO-crCLIM-v1-1	CLMcom-ETH
24	MPI-M-MPI-ESM-LR	ALADIN63	CNRM
25	MPI-M-MPI-ESM-LR	HIRHAM5	DMI
26	MPI-M-MPI-ESM-LR	RegCM4-6	ICTP
27	MPI-M-MPI-ESM-LR	RACMO22E	KNMI
28	MPI-M-MPI-ESM-LR	REMO2009	MPI-CSC
29	MPI-M-MPI-ESM-LR	RCA4	SMHI
30	NCC-NorESM1-M	COSMO-crCLIM-v1-1	CLMcom-ETH
31	NCC-NorESM1-M	HIRHAM5	DMI
32	NCC-NorESM1-M	REMO2015	GERICS
33	NCC-NorESM1-M	WRF381P	IPSL
34	NCC-NorESM1-M	RACMO22E	KNMI
35	NCC-NorESM1-M	RCA4	SMHI

TABLA 1. Modelos climáticos regionales (MCR) de EURO-CORDEX seleccionados, acompañados del correspondiente modelo climático global (MCG) y del instituto que los desarrolló.

donde $c_1 = 4.3 \,^{\circ}\text{C}$, $c_2 = 0.943$, $c_3 = 0.028 \,^{\circ}\text{C} m^2 W^{-1}$ y $c_4 = -1.528 \,^{\circ}\text{C} s m^{-1}$. Obsérvese que tanto la radiación solar como la temperatura del aire contribuyen a aumentar la temperatura del panel solar mientras que el viento contribuye a enfriar los paneles. No obstante, a partir de las ecuaciones (1)-(3) puede comprobarse que el recurso solar depende mayoritariamente del valor de la radiación incidente de onda corta, y no tanto de la velocidad del viento o la temperatura del aire, puesto que el coeficiente γ en la ecuación (2) es pequeño en comparación con el valor de la radiación solar.

2.2.2. Cálculo de la variación del recurso solar y de los factores ambientales.

El porcentaje de cambio en las variables de interés se calcula mediante la expresión (4),

$$\frac{\Delta Var}{100}(\%) = \frac{Var_f - Var_h}{Var_h} \quad (4)$$

donde ΔVar es el porcentaje de cambio en la variable, Var_f es el valor de la variable en el futuro (bien cercano o lejano) y Var_h es el valor de la variable en el periodo histórico. Se aplica para cada modelo y cada cuadrícula de la malla, tanto a los valores promediados temporalmente a todo el periodo como a los valores promediados a los meses de las cuatro estaciones del año.

2.2.3. Estimación de la influencia del cambio en los factores ambientales sobre el cambio en el recurso solar.

El cambio de los factores ambientales generará un cambio en el recurso solar. Cabe preguntarse cuál será la influencia de cada cambio sobre el recurso. Teniendo como referencia a Jerez et al. (2015), a partir de las ecuaciones (1)-(3), puede demostrarse que el recurso solar fotovoltaico, *PV*, puede expresarse también como:

$$PV = \alpha_1 \cdot RAD + \alpha_2 \cdot RAD^2 +$$
(5)
+ $\alpha_3 \cdot RAD \cdot T + \alpha_4 \cdot RAD \cdot W$

donde $\alpha_1 = 1.1035$, $\alpha_2 = -1.4 \cdot 10^{-4} m^2 W^{-1}$, $\alpha_3 = -4.715 \cdot 10^{-3} \, {}^{\circ}\text{C}^{-1} \, \text{y} \, \alpha_4 = 7.64 \cdot 10^{-3} \, \text{s} \, m^{-1}$.

A partir de la ecuación (5) puede inferirse el cambio en el recurso solar fotovoltaico, ΔPV . debido las а variaciones en los tres factores ambientales como hacen Jerez et al. (2015) en su ecuación (4). La influencia (o peso) que ejerce el cambio de uno de los tres factores ambientales sobre el cambio en el recurso solar puede estimarse anulando la variación en los otros dos factores. Debe tenerse en cuenta que es un cálculo aproximado, puesto que aparecen términos cruzados que impiden calcular la contribución exacta de cada variable al cambio en el recurso solar.

2.2.4. Estudio de la estabilidad del recurso solar fotovoltaico.

La estabilidad de los recursos en el contexto de energías renovables es un factor a tener en cuenta, ya que su intermitencia puede suponer un problema en el suministro a la red eléctrica. Por ello, se busca que las fuentes de energía renovables sean lo más estables posible a lo largo de todo el año. Para cuantificar la estabilidad existe lo que se conoce como índice de estabilidad (*monthly variability index*, M_{ν}), y se calcula como

$$M_{v} = \frac{PV^{MAX} - PV^{MIN}}{PV^{a\tilde{n}o}} \qquad (6)$$

donde PV^{MAX} y PV^{MIN} representan los valores de recurso solar promedio en el mes de mayor y menor PV, respectivamente. PV^{ano} es el valor

promedio a todo el año climatológico. Nótese que un índice de estabilidad alto indica una gran variación de recurso solar y, por lo tanto, baja estabilidad.

2.2.5. Validación de los modelos.

El proceso de validación tiene la finalidad de comprobar cuánto se parecen los resultados de las simulaciones a la realidad. Para ello se utilizó una base de datos de reanálisis como datos "reales", que aúna datos de satélite y medidas in situ mediante interpolaciones en una malla regular. Para validar los modelos se utiliza un test de solapamiento, también llamado test de Perkins (Perkins et al., 2007). Este método basa en evaluar se cuantitativamente la similitud entre los datos observados y los resultados de los modelos, comparando las frecuencias relativas de ambas series de datos, y presenta la ventaja de que se tiene en cuenta todo el rango de datos. Esta metodología ha sido ampliamente utilizada en trabajos previos (Costoya et al., 2019; Des et al., 2021). Se ha escogido el periodo 1986-2005 debido a que es el periodo común más amplio disponible en ambas series de datos en el momento de realizar este estudio. A la hora de validar los modelos, hay que asegurarse en primer lugar de que los datos de EURO-CORDEX y ERA5 compartan una malla común. Como las dos series de datos no comparten la misma resolución, es necesario realizar un interpolado. Por otro lado, la escala temporal de ERA5 es horaria, en contraposición con los datos de EURO-CORDEX. que son diarios. Por consiguiente, es necesario realizar un promedio temporal sobre los datos de ERA5 a los 24 valores de cada día.

Una vez se dispone de las dos series de datos referidas a la misma malla $(0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ})$ y en la misma escala temporal (diaria), se está en condiciones de aplicar

el test de solapamiento. Este test se sobre ejecuta el recurso solar fotovoltaico, la radiación incidente de onda corta, la temperatura del aire y la velocidad del viento, para cada cuadrícula de la malla y cada modelo. Para cuantificar el solapamiento se utiliza la ecuación (7), donde nrepresenta el número de intervalos en los que se divide el rango de valores entre los que oscila la variable.

$$Solapamiento(\%) = \sum_{1}^{n} \min(PV_{CORDEX}, PV_{ERA5})$$
(7)

De este modo, cuanto más parecidos sean los histogramas, más cercano estará el valor de solapamiento al 100%.

Una vez calculados los porcentajes de solapamiento para cada modelo y cada cuadrícula de la malla, se realiza un promedio a todas las cuadrículas, de forma que se tenga un único valor de solapamiento por cada modelo. El modelo se dará por válido si su valor de solapamiento es mayor o igual que el promedio de solapamientos de todos os modelos menos dos desviaciones estándar, σ_i :

$$Solapamiento(i) \ge$$

$$\ge \langle Solapamiento(i) \rangle - 2\sigma_i$$
 (8)

En caso de que existiese algún modelo i que no cumpliese la ecuación (8), no se tendría en cuenta a la hora de realizar el promedio a todos los modelos (sección 2.2.6.).

2.2.6. Enfoque multimodelo.

En este estudio se ha optado por hacer un enfoque multimodelo, que consiste en promediar los valores de la temperatura, radiación, viento o recurso solar de los modelos previamente validados, de tal forma que se obtenga un único valor de dichas variables por cada cuadrícula de la malla, sin distinguir entre modelos. El enfoque multimodelo ha sido utilizado en numerosos artículos científicos como Costoya et al. (2020) y permite aportar robustez a las predicciones, ya que estudios previos mostraron que el enfoque multimodelo reduce los sesgos de los modelos individuales (Abramowitz et al., 2019; Duan et al., 2019).

2.2.7. Análisis estadístico y criterio de consenso multimodelo.

A la hora de analizar la evolución histórica de las variables de estudio considerando un multimodelo es necesario tener en cuenta cuánto se desvía cada uno de los modelos respecto a la media del multimodelo y para ello se calcula su desviación estándar. Además, para determinar si el porcentaje de cambio de las distintas variables en un futuro cercano y lejano respecto al periodo histórico es o no significativo se utiliza el "criterio de consenso". El método del "criterio de consenso" se compone de dos fases para saber si el cambio en las variables será significativo. En la primera fase se trata de contar el número de modelos que coinciden en la dirección del cambio que predice el multimodelo. Solamente se considerarán cambios significativos en aquellas cuadrículas de la malla que cumplan que al menos el 75% de los modelos climáticos regionales estén de acuerdo con la dirección del cambio que predice el multimodelo. En la segunda fase ha de cumplirse que por lo menos el 75% de los modelos climáticos que hayan superado la primera fase superen el test de Mann-Whitney-Wilcoxon, también llamado test de suma de rangos de Wilcoxon. Este test coteja la hipótesis nula de que dos muestras independientes pertenezcan a distribuciones continuas con medianas iguales con la hipótesis alternativa de que no lo hagan, y sirve

para comprobar si dos muestras pertenecen a la misma población. El criterio de consenso ya ha sido empleado en previos trabajos de investigación como, por ejemplo, Costoya et al. (2019) y Costoya et al. (2020).

3. Resultados

3.1. Análisis de la fiabilidad de los modelos

El valor de solapamiento para la radiación incidente de onda corta, la temperatura del aire, la velocidad del viento y el recurso solar fotovoltaico para cada una de las simulaciones aparece en la Tabla 2.

Analizando los valores de solapamiento del recurso solar fotovoltaico se puede observar que todas las simulaciones cumplen el criterio de validación (ecuación (8)). Por este motivo no se ha descartado ninguna simulación a la hora de hacer el multimodelo y todos los cálculos posteriores. Además, se ha obtenido un valor alto de solapamiento (86.20%) al promediar todas las simulaciones. Por lo tanto, puede concluirse que los modelos simulan correctamente los datos de reanálisis de Analizando ERA5. el valor del solapamiento variable por variable, también se han encontrado valores medios de solapamiento por encima del 80%. La variable mejor representada es velocidad del viento, con la un porcentaje de solapamiento del 88.93%, seguido de la radiación (85.98%).

Arguilé-Pérez et al., ACT 11, 18-39, 2021

	Solapamiento (%)			
Número del modelo	Radiación	Temperatura del aire	Velocidad del viento	Recurso solar fotovoltaico
	(RAD)	(T)	(W)	(PV)
1	89.82	79.80	90.89	90.39
2	86.86	82.14	85.42	85.84
3	87.26	87.62	87.06	87.42
4	83.43	86.87	88.37	83.67
5	79.72	88.58	86.02	79.28
6	87.62	80.63	86.84	88.04
7	92.02	82.23	87.20	92.07
8	88.64	90.97	88.90	88.33
9	86.24	83.74	88.44	86.40
10	91.84	85.15	88.50	92.28
11	81.23	76.37	91.76	81.42
12	81.29	69.69	83.16	80.72
13	85.61	71.96	90.86	85.44
14	90.50	73.73	90.50	90.99
15	88.81	79.68	89.85	89.70
16	80.99	80.63	89.40	81.94
17	86.96	84.07	89.45	86.89
18	85.70	79.10	87.38	86.89
19	80.20	82.51	88.76	79.98
20	87.53	81.22	92.64	88.46
21	91.28	82.32	93.48	91.33
22	87.30	84.10	88.97	88.21
23	79.34	86.84	88.30	79.79
24	83.80	84.36	86.93	83.29
25	85.58	87.20	87.59	85.68
26	86.06	74.80	81.66	87.73
27	85.42	82.53	87.72	85.88
28	80.85	87.43	89.58	81.03
29	92.24	83.84	87.40	92.64
30	81.84	81.43	91.94	81.83
31	87.74	72.42	90.99	87.43
32	85.85	73.87	93.17	85.68
33	79.84	76.73	90.85	79.54
34	87.37	81.71	90.60	87.79
35	92.59	80.39	91.94	93.01
	85.98	81.33	88.93	86.20
Multimodelo	<u>±</u>	<u>±</u>	<u>±</u>	<u>±</u>
	3.94	5.12	2.61	4.09

TABLA 2. Porcentaje de solapamiento para las tres variables que participan en el recurso solar fotovoltaico y del propio recurso solar fotovoltaico para cada modelo regional. La última fila muestra el porcentaje de solapamiento para el multimodelo con su desviación estándar.

3.2. Análisis del recurso solar y proyección futura

En esta sección se muestran los mapas de distribución del recurso solar fotovoltaico, la temperatura del aire, la velocidad del viento y la radiación incidente de onda corta al oeste de la Península Ibérica en el periodo histórico (1990-2019), según los modelos de EURO-CORDEX de la Tabla 1. También se muestran las predicciones del cambio de estas variables en los dos periodos futuros bajo análisis. En este caso, se representará además un punto de color negro en aquellas cuadrículas de la malla para las cuales los cambios son significativos, en base al criterio de consenso del multimodelo (sección 2.2.7). Además. se presenta la estabilidad del recurso solar a lo largo del año. El recurso solar fotovoltaico se calculó mediante las ecuaciones (1)-(3), siguiendo la metodología descrita en la sección 2.2.1. En la Figura 4 se muestra el mapa de distribución del recurso solar fotovoltaico y de su desviación estándar, promediados a todo el periodo histórico, resultado del multimodelo.

En la Figura 4A puede apreciarse un gradiente latitudinal del recurso solar fotovoltaico en el periodo histórico, con valores más altos (comprendidos entre 200 y 210 Wm⁻²) en el sur y más bajos en el norte (en torno a 160 Wm⁻²), con un cierto gradiente longitudinal. Los valores máximos de recurso solar para el área bajo estudio son los que presenta el Golfo de Cádiz, al sur de la Península Ibérica.



Fig. 4. (A) Recurso solar fotovoltaico anual para el periodo 1990-2019. (B) Desviación estándar para el recurso solar fotovoltaico en el periodo 1990-2019.

A continuación, se describirán los patrones de distribución de las variables ambientales que influyen en el recurso solar, así como sus variaciones en el futuro. La distribución de la radiación de onda corta incidente en el periodo histórico se representa en la Figura 5. Se observa un patrón muy similar al del recurso solar fotovoltaico (Figura 4), ya que la radiación es la variable ambiental que más influye en el recurso solar. El patrón de distribución del recurso solar es heterogéneo, ya que muestra un gradiente latitudinal, con valores más bajos en el norte (~150 Wm⁻²) y mayores en el sur (~205 Wm⁻²).



Fig. 5. (A) Radiación anual para el periodo 1990-2019. (B) Desviación estándar de la radiación para el periodo 1990-2019.

La Figura 6 muestra que la radiación aumentará en la costa oeste de la Península Ibérica, tanto en el futuro cercano como en el lejano. El incremento se producirá sobre todo en latitudes de las Rías Altas, las Rías Baixas y en el norte y centro de Portugal hacia mar adentro (~2% en el futuro lejano). Sin embargo, la radiación disminuirá sobre el océano al norte y al sur de la Península (~ -0.5%). Los modelos predicen un aumento de la radiación de onda corta incidente más pronunciado en el futuro lejano (Figura 6B) que en el futuro cercano (Figura 6A).



Fig. 6. (A) Porcentaje de variación de la radiación en el futuro cercano (2030-2059). (B) Porcentaje de variación de la radiación en el futuro lejano (2070-2099).

En la Figura 7A se aprecia un claro gradiente latitudinal de temperatura. Los valores mínimos se alcanzan en la costa norte de Galicia, en proximidades de las Rías Altas, y la costa asturiana (~14°C). Los valores máximos (~18°C) se obtienen en el Golfo de Cádiz.



Fig. 7. (A) Temperatura del aire anual para el periodo histórico 1990-2019. (B) Desviación estándar de la temperatura del aire en el periodo 1990-2019.

La Figura 8 muestra el porcentaje de cambio de la temperatura en el futuro. Se observa que la temperatura se verá incrementada en el futuro, tanto cercano (Figura 8A) como lejano (Figura 8B), aunque el incremento será mayor en el futuro lejano (~15%), y este incremento será bastante homogéneo en todo el oeste de la Península Ibérica. También se observa que los cambios serán significativos en la gran mayoría de cuadrículas de la malla, para ambos futuros.



Fig. 8. (A) Porcentaje de variación de la temperatura del aire en el futuro cercano (2030-2059). (B) Porcentaje de variación de la temperatura del aire en el futuro lejano (2070-2099).

El patrón de la velocidad del viento en el periodo histórico (Figura 9) es muy diferente al de la temperatura, puesto que el primero no presenta un gradiente latitudinal, sino que influye más la proximidad a tierra. La velocidad del viento en el periodo histórico es menor en las proximidades de la costa que en mar abierto. Los valores máximos (~8.5 m s⁻¹) se obtienen al noroeste de Galicia.



Fig. 9. (A) Velocidad del viento anual para el periodo 1990-2019. (B) Desviación estándar de la velocidad del viento en el periodo 1990-2019.

En la Figura 10 puede verse que la velocidad del viento disminuirá para ambos futuros, siendo la disminución

más acusada en el futuro lejano (Figura 10B). La principal disminución de la velocidad del viento tendrá lugar en la costa (~ -2%), donde ya se tenían valores más bajos de la velocidad en el periodo histórico, tal y como se vio en la También Figura 9. se observa disminución de la velocidad del viento en el mar Cantábrico y el Golfo de Cádiz $(\sim -2.5\%)$. Sin embargo, los cambios solo serán significativos en el Golfo de Cádiz y en la costa portuguesa a unos 38°N para el futuro lejano (~4%).



Fig. 10. (A) Porcentaje de variación de la velocidad del viento en el futuro cercano (2030-2059). (B) Porcentaje de variación de la velocidad del viento en el futuro lejano (2070-2099).

Como se ha comentado anteriormente, la radiación es la variable más influyente en el recurso solar fotovoltaico. Sin embargo. también puede resultar interesante estudiar cuál es el peso que las variaciones futuras de la temperatura y el viento tendrán en la variación total del recurso solar fotovoltaico. La Figura 11A representa la variación total del recurso solar fotovoltaico para el futuro cercano. Se observa que la tendencia general del recurso solar es a disminuir en el futuro, aunque aumentará al oeste de Galicia, en las proximidades de las Rías Baixas, así como al norte de Portugal (~ +0.5%). En el resto de las regiones disminuirá aproximadamente un 0.5%.



Fig. 11. (A) Porcentaje de variación del recurso solar fotovoltaico en el futuro cercano (2030-2059) y (B) en el futuro lejano (2070-2099).

La Figura 12 representa la influencia de los cambios en los factores ambientales sobre el recurso solar en el futuro lejano. Nótese que tanto el aumento de la temperatura (como se vio en la Figura 8B) como la disminución del viento (Figura 10B) contribuyen a disminuir el recurso solar (Figuras 12B y 12C). Los cambios en la temperatura contribuirán a disminuir recurso el solar en aproximadamente un 1% (Figura 12B). La variación en la velocidad del viento provocará que el recurso solar disminuva entre un ~ 0.1% y un ~ 0.2% (Figura 12C). Obsérvese también que el peso del cambio en la radiación (Figura 12A) predice un aumento bastante generalizado en el recurso solar ($\sim 1.5\%$) que contrasta con el aumento localizado únicamente en las Rías Baixas y norte de Portugal de la Figura 11B. La diferencia entre las Figuras 12A y 11B destaca la importancia de los cambios en la temperatura y el viento sobre los cambios en el recurso solar fotovoltaico. Es decir, aunque se prevé que la variación de la radiación (Figura 6B) y su influencia sobre el cambio en el recurso solar aumenten de forma generalizada en toda la región, en la Figura 11B se observa que el recurso solar disminuirá alrededor del 1.2% en la mayor parte de la región de estudio.



Fig. 12. (A) Peso de la variación en la radiación, la temperatura (B) y el viento (C) sobre el cambio en el recurso solar fotovoltaico en el futuro lejano (2070-2099).

Además de estudiar el promedio anual del recurso solar fotovoltaico, se analiza también el recurso en las cuatro estaciones del año, con el objetivo de caracterización realizar una más completa del recurso solar y conocer su estabilidad a lo largo del año. En la Figura 13 se muestra el recurso solar fotovoltaico que resulta del multimodelo promediado en los meses de las cuatro estaciones del año, junto con sus desviaciones típicas. Se aprecia una clara variación según la estación. En invierno se alcanzan los valores más bajos de todo el año. El patrón de distribución es

bastante homogéneo, aunque con valores mínimos en el norte ($\sim 100 \text{ Wm}^{-2}$). En los meses de primavera se obtiene el mayor gradiente latitudinal, con valores más bajos en el norte (~200 Wm⁻²) que en el sur (~250 Wm⁻²). La estación estival presenta los valores de recurso solar más altos del año climatológico. Existe cierto gradiente latitudinal, pero menos pronunciado que en primavera (~250 Wm^{-2} en el norte y ~300 Wm^{-2} en el sur). En otoño aparece un ligero gradiente latitudinal, con valores de ~170Wm⁻² en el sur y ~140 Wm⁻² en el norte.



Fig. 13. Recurso solar fotovoltaico estacional para el periodo histórico (1990-2019) y sus desviaciones estándar. (A, E) Invierno (dic-feb), (B, F) primavera (mar-may), (C, G) verano (jun-ago) y (D, H) otoño (sep-nov).

La Figura 14 muestra los cambios del recurso solar estación por estación en el futuro lejano. Se observa que el patrón de variación del recurso solar en el futuro también es diferente según la estación del año. El recurso solar disminuirá en los meses de invierno en un futuro lejano en la mitad norte de la Península Ibérica. con valores de ~ -1.5% en la costa oeste de Portugal y ~ -2% en Galicia y en el mar Cantábrico. Al sur de la península se espera un incremento del recurso solar del ~ +0.5%. En primavera, el aumento del recurso solar se desplaza hacia el norte, de forma que toda la costa oeste presentará un aumento de recurso solar $(\sim +0.5\%)$. Sin embargo, en el sur de la Península se espera una disminución del recurso (~ -0.25%). El noroeste de la Península Ibérica también presentará una disminución en primavera, pero menos acusada que en invierno (~ -1.5%). En los meses de verano se espera un mayor recurso al noroeste de la Península Ibérica (~ 1.5%) y una disminución en el sur (~ -2%). En otoño se aprecian menores variaciones respecto al periodo histórico que en el resto de las estaciones, con aumento de recurso solar al sur de Galicia y norte de Portugal (~ +1%) y una disminución en el resto de las latitudes (~-1%).

En la Figura 15 se muestran los resultados para el índice de estabilidad en el periodo histórico, calculado según la metodología descrita en la sección 2.2.4. Puede apreciarse que la mayor estabilidad del recurso solar (valores de M_v más bajos) se obtiene en la mitad sur de la Península Ibérica (M_v ~1.1), mientras que en la mitad norte el recurso solar es menos estable (valores de M_v más altos, M_v ~1.35). Las Rías Baixas tienen un recurso solar poco estable en comparación con el resto de las regiones (M_v ~1.4).



Fig. 14. Variación del recurso solar fotovoltaico en porcentaje durante el (A) invierno, (B) primavera, (C) verano y (D) otoño para el futuro lejano (2070-2099).



Fig. 15. (A) Índice de estabilidad en el periodo 1990-2019. (B) Desviación estándar del índice de estabilidad.

Se espera un aumento general en la estabilidad del recurso solar (M_{12} ~ -1.5%) en el futuro cercano (Figura 16A). estabilidad La del recurso únicamente disminuirá al noroeste de Galicia ($M_{\nu} \sim +0.5\%$). Sin embargo, en el futuro lejano (Figura 16B) los modelos predicen una gran disminución de la estabilidad del recurso solar para latitudes al norte de 41°N ($M_{\nu} \sim +1.5\%$). La estabilidad del recurso en la mitad sur aumentará respecto al periodo histórico, pero menos que en el futuro cercano ($M_v \sim -1.3\%$).



Fig. 16. Variación del índice de estabilidad en porcentaje en (A) el futuro cercano (2030-2059) y (B) el futuro lejano (2070-2099).

4. Discusión

Es bien conocido que el desarrollo de las energías renovables es fundamental en la lucha contra el cambio climático en un intento por disminuir la emisión de gases de efecto invernadero generados por la quema de combustibles fósiles (Oliveira-2020). Pinto Stokkermans, Sin V todas embargo, no ellas se han nivel. desarrollado al mismo En concreto, la energía solar fotovoltaica offshore apenas lleva existiendo 7 años, desde su primera instalación en las Maldivas en el año 2014 (Soukissian et al., 2021), en contraposición con la energía eólica offshore que comenzó en Dinamarca en 1991 (EESI, 2010). Por lo tanto. se puede decir aue el aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica offshore se encuentra todavía en un estado de desarrollo inicial. De hecho, todavía no se han instalado parques solares comerciales y es necesario ahondar en el conocimiento del recurso solar offshore para favorecer un mejor aprovechamiento futuro. Así, en este estudio se intenta profundizar en el conocimiento de la energía solar fotovoltaica en el océano, al oeste de la Península Ibérica. Para ello, lo primero que se hizo fue analizar el recurso solar

fotovoltaico promedio anual histórico. Los resultados (Figura 4A) han mostrado mayor disponibilidad de recurso solar fotovoltaico al sur y al suroeste de la Península Ibérica, sobre todo en el Golfo de Cádiz. Soukissian et al. (2021) estudiaron el recurso solar en el mar Mediterráneo, incluyendo el mar de Alborán. Debido a su proximidad con el Golfo de Cádiz, puede compararse el recurso solar de ambas regiones. encontrando valores muy similares: ~210 Wm⁻² en el Golfo de Cádiz y ~220 Wm⁻² en el mar de Alborán. López et al. (2020) analizaron el recurso solar sobre la costa asturiana, mediante datos del proyecto Predicción de los Recursos Energéticos Mundiales (Prediction of the Worldwide Energy Resources, POWER). Sus resultados mostraron que los valores de radiación solar en la región asturiana se hallaban en el rango de 125 a 165 Wm⁻². Los valores de radiación y también de recurso solar encontrados en este estudio en la zona del Cantábrico Wm^{-2} (unos 155 v 160 Wm^{-2} . respectivamente) están de acuerdo con el resultado de López et al. (2020).

A pesar de que las energías renovables son de gran importancia para combatir el cambio climático, es importante tener en cuenta que el propio cambio climático también tiene un impacto sobre la producción de muchas energías renovables. En concreto, en el caso de la energía fotovoltaica, es imprescindible comprobar cuáles serán los efectos del cambio climático en la radiación, la temperatura del aire y el viento, y cómo afectarán al recurso solar en los próximos años. Los resultados han mostrado un aumento significativo de la temperatura en toda la región de estudio (Figura 8), así como una disminución generalizada de la velocidad del viento (Figura 10). En cuanto a la radiación, los modelos predicen un aumento generalizado al oeste de la Península Ibérica (Figura 6). Pese a que en

principio cabría esperar que el cambio en la radiación fuera muy similar al cambio en el recurso solar, se ha comprobado que el aumento de la temperatura y la disminución de la velocidad del viento tienen un impacto importante en el cambio del recurso solar en el futuro. Dichos cambios en estas variables ambientales contribuyen a disminuir el recurso solar; ya que, por un lado, el aumento de la temperatura del aire provoca el calentamiento de los paneles solares y, por otro lado, la disminución de la velocidad del viento reduce la renovación del aire circundante, y en consecuencia aumenta la temperatura del panel. Como resultado, en lugar de esperar un aumento generalizado del recurso, al igual que ocurre con la radiación, se prevé una diminución en la mayor parte de la región tanto para el futuro cercano (Figura 11A) como para el futuro lejano (Figura 11B).

El aumento de la temperatura en el futuro no es algo sorprendente, ya que es una de principales consecuencias las del aumento de gases de efecto invernadero en la atmósfera. La disminución en la velocidad del viento podría justificarse con la expansión de la celda de Hadley, el desplazamiento hacia el norte de la corriente en chorro y las trayectorias de las tormentas, todo ello consecuencia del cambio climático (Tobin et al., 2015). La radiación de onda corta puede verse modificada debido a un cambio en la cantidad y el tipo de nubosidad y/o a la concentración de aerosoles en la atmósfera. ya aue afectan considerablemente a los flujos de entrada y salida de radiación del sistema climático (IPCC, 2013). En el Quinto Informe de Evaluación del IPCC se señala que las nubes altas son capaces de retener más radiación de onda larga que las nubes bajas. Mayor cantidad de nubes altas en relación a nubes bajas provocaría por lo tanto un aumento de la temperatura en el planeta. Las nubes

bajas y medias, en cambio, reflejan gran cantidad de radiación de onda corta procedente del Sol, que es enviada nuevamente hacia el espacio. Además, apenas retienen radiación de onda larga. Es decir, las nubes bajas tienen un efecto neto de enfriamiento global. La mayoría de los modelos climáticos que se han evaluado por el IPCC predicen una disminución de nubes bajas en un clima futuro más cálido. Esta disminución en la cantidad de nubes bajas y medias podría explicar el aumento generalizado de la radiación de onda corta al oeste de la Península Ibérica (Figura 6).

Uno de los principales obstáculos a los que se enfrentan las energías renovables es que no son estables a lo largo del año (Oliveira-Pinto et al., 2020). Analizando la variabilidad estacional del recurso (Figura 13), se ha observado que el verano es la estación con mayor disponibilidad recurso del solar. mientras que en invierno el recurso solar es más escaso. Los resultados han mostrado que se espera que el recurso solar sea más estable en la mitad sur de la Península Ibérica, mientras que en la mitad norte se predice menor estabilidad (Figura 15). La estabilidad de la mitad norte se verá reducida porque se predicen valores de recurso solar más bajos en invierno (Figura 14A) y más altos en verano (Figura 14C). En cambio, en la mitad sur de la Península ocurre lo contrario.

Atendiendo a los valores de recurso solar fotovoltaico promedio anual en el periodo histórico, en las cuatro estaciones del año y a su estabilidad, se propone el Golfo de Cádiz como la zona más adecuada para la instalación de paneles fotovoltaicos offshore. Aunque en esa zona la temperatura del aire sea mayor que en latitudes más altas y el viento no sea tan intenso como en el noroeste de la Península, dichos factores ambientales no son tan importantes

como la radiación incidente de onda corta, que es la variable que más afecta al recurso solar, que presenta un alto valor anual en el Golfo de Cádiz. Esta zona cuenta con valores más altos de recurso solar que las demás regiones en cada una de las cuatro estaciones del año. Además, se ha comprobado que muestra un recurso solar más estable en el periodo de referencia (Figura 15A) y que su estabilidad aumentará en el futuro (Figura 16). En otras regiones de la Península Ibérica, como Galicia, pese a no presentar actualmente las mejores condiciones para la instalación de paneles solares offshore, se espera un incremento del recurso solar en el futuro (Figura 11), lo que puede ser interesante de cara a mejorar la explotación del recurso fotovoltaico en el océano.

En aquellas regiones en las que el recurso solar no sea suficiente por sí solo para llevar a cabo una explotación energética rentable, puede resultar de utilidad combinar gran energías renovables y formar parques híbridos. De este modo, podría suplirse una mayor parte de la demanda energética mediante energías renovables. Por esta razón, son varios los estudios que han investigado la opción de combinar la energía solar offshore con otras formas de energías renovables marinas. Por ejemplo, López et al. (2020) y Soukissian et al. (2021) muestran que el uso combinado de la energía solar fotovoltaica y la energía eólica marina muestra mejoras en la estabilidad anual y supone un aumento de la producción energética. Oliveira-Pinto el al. (2020) observaron el mismo resultado al combinar la energía solar fotovoltaica con la energía undimotriz. En las costas de Galicia podrían construirse parques eólicos en combinación con placas solares flotantes para conseguir un recurso mayor y más estable.

favor Otro argumento а de la combinación de diferentes energías renovables marinas es que los meses de invierno y verano son aquellos en los que existe mayor demanda energética (Red Eléctrica de España [REE]). Los datos de demanda energética en España pueden obtenerse en https://www.ree.es/es/datos/demanda/ev olucion. Por ello, y para suplir la demanda, se busca disponer de fuentes renovables que produzcan energía especialmente en esos meses. A la hora de cubrir el pico de demanda energética durante el verano, la energía solar fotovoltaica offshore puede jugar un papel muy importante puesto que es la energía renovable que presenta un máximo durante esta estación. Otras energías renovables marinas como por ejemplo la eólica o undimotriz presentan en el oeste de la Península Ibérica su máxima producción durante el invierno (Ribeiro et al., 2020).

5. Conclusiones

En este trabajo se ha analizado el recurso solar fotovoltaico offshore al oeste de la Península Ibérica. Además, se ha estudiado su variabilidad estacional y se ha calculado la estabilidad del recurso. Este análisis se ha llevado a cabo para un periodo histórico de referencia (1990-2019) y dos periodos futuros: cercano (2030-2059) y lejano (2070-2099), con el objetivo de conocer cómo afectará el cambio climático al recurso solar. Con este propósito, se utilizaron datos de 35 simulaciones del proyecto EURO-CORDEX que fueron previamente validadas con datos de reanálisis de ERA5. Las principales conclusiones de este trabajo son las siguientes:

En primer lugar, las simulaciones del proyecto EURO-CORDEX han demostrado ser una buena herramienta para calcular el recurso solar en la región

de estudio debido a su gran resolución espacio-temporal y a su buena representatividad de la realidad.

Las regiones donde se ha encontrado mayor recurso solar fotovoltaico en el periodo de referencia se localizan en la costa Atlántica al sur de la Península Ibérica, sobre todo en el Golfo de Cádiz. Los altos valores del recurso solar en estas zonas se deben a la alta radiación de onda corta que recibe este lugar.

En el futuro, la radiación de onda corta aumentará en la mayor parte del área de estudio, sobre todo en las costas de Galicia y norte y centro de Portugal. La temperatura aumentará significativamente en toda la región. También se espera que la intensidad del viento disminuya en el área de estudio. Estos cambios contribuirán a disminuir el recurso solar. A pesar del aumento generalizado de la radiación de onda corta, los cambios observados en la temperatura y el viento contribuyen a disminuir el recurso solar en el futuro. Por lo tanto, el impacto del cambio sobre la energía climático solar fotovoltaica offshore será negativo en la mayor parte de la región, con la excepción del oeste de Galicia y norte de Portugal.

En cuanto a la variabilidad estacional del simulaciones recurso. las han demostrado que el recurso solar fotovoltaico alcanza sus valores máximos en verano, y mínimos en invierno. Al analizar la estabilidad del recurso se ha encontrado que es más estable en la mitad sur de la Península que en la mitad norte. De cara al futuro, la estabilidad aumentará de forma general en el futuro cercano. Sin embargo, en el futuro lejano, la mitad norte presentará un recurso menos estable respecto al periodo de referencia y la mitad sur aumentará su estabilidad.

Atendiendo a los resultados, el Golfo de Cádiz es la mejor zona para instalar paneles solares fotovoltaicos offshore porque ha presentado mayor recurso solar en el periodo de referencia, tiene mayor recurso solar que el resto de las regiones en las cuatro estaciones del año, el recurso allí es más estable y aún lo será más en el futuro. Sin embargo, no deben descartarse otras regiones como Galicia, donde podrían instalarse parques híbridos en los que se combinen la energía solar fotovoltaica con la energía eólica.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Grupo de Trabajo del World Climate Research Programme (WCRP) sobre el clima regional (WGRC), al Grupo de Trabajo sobre Modelado Acoplado (WGCM), a los grupos de modelado listados en la Tabla 1 de este artículo por producir y hacer posible sus salidas de modelos, a la Federación de Redes del Sistema (ESGF) esfuerzo Terrestre (un internacional liderado por el Programa de Diagnóstico e Intercomparación de Modelos Climáticos del Departamento de Energía de EEUU), a la Red Europea para el Modelado del Sistema Terrestre y otros colaboradores en la Organización Mundial para Portales de Ciencia del Sistema Terrestre (GO-ESSP). Gracias al Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas Plazo Medio a (ECMWF) y al Servicio de Cambio Climático de Copernicus por aportar y hacer posible los datos de reanálisis de ERA5 usados en este trabajo. Gracias también a la REE por sus datos de demanda energética en España. También agradecemos a la empresa noruega Ocean Sun por cedernos la Figura 2, y a la Asociación de Empresas de Energías Renovables (APPA) por la cesión de los datos de la Figura 1.

Bibliografía

- Abramowitz, G., Herger, N., Gutmann, E., Hammerling, D., Knutti, R., Leduc, M., Lorenz, R., Pincus, R. y Schmidt, G. A. (2019). ESD Reviews: Model dependence in multi-model climate ensembles: weighting, subselection and out-of-sample testing. *EarthSystem Dynamics*, 10(1), 91-105. doi:10.5194/esd-10-91-2019
- APPA Renovables. (2021a). *Renovables en el mundo y en Europa*. Recuperado de <u>https://www.appa.es/energias-</u> <u>renovables/renovables-en-el-mundo-</u> <u>y-en-europa/</u>
- APPA Renovables. (2021b). *Renovables en España*. Recuperado de <u>https://www.appa.es/energias-</u> <u>renovables/renovables-en-espana/</u>
- Benestad, R., Buonomo, E., Gutiérrez, J.M., Haensler, A., Hennemuth, B., Illy, T., ... y Zsebeházi, G. (2021). Guidance for EURO-CORDEX climate projections data use. *EURO-CORDEX Community*. Recuperado de <u>https://www.climate-servicecenter.de/imperia/md/content/csc/cor dex/guidance for eurocordex_climate_projections_data_us e_2021-02.pdf</u>
- Buljan, A. (2021, 18 de junio). Saitec Unveils Floating Wind Project Off Bilbao. Offshore Wind. Recuperado de https://www.offshorewind.biz/2021/0 6/18/saitec-unveils-floating-windproject-off-bilbao/
- Chenni, R., Makhlouf, M., Kerbache, T. y Bouzid, A. (2007). A detailed modeling method for photovoltaic cells. *Energy*, 32, 1724-1730.<u>doi:10.1016/j.energy.2006.12.0</u> <u>06</u>

- Costoya, X., de Castro, M., Santos, F., Sousa, M.C. y Gómez-Gesteira, M. (2019). Projections of wind energy resources in the Caribbean for the 21st century. *Energy*, *178*, 356-367.<u>doi:10.1016/j.energy.2019.04.12</u> <u>1</u>
- Costoya, X., de Castro, M., Carvalho, D. y Gómez-Gesteira, M. (2020). On the suitability of offshore wind energy resource in the United States of America for the 21st century. *Applied Energy*, 262, 114537.doi:10.1016/j.apenergy.2020. 114537
- Des, M., Fernández-Nóvoa, D., de Castro, M., Gómez-Gesteira, J.L., Sousa, M.C. y Gómez-Gesteira, M. (2021). Modeling salinity drop in estuarine areas under extreme precipitation events within a context of climate change: Effect on bivalve mortality in Galician RíasBaixas. *Science of the Total Environment*, 790, 148147. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.148147
- Duan, H., Zhang, G., Wang, S. y Fan, Y. (2019). Robust climate change research: a review on multi-model analysis. *Environmental Research Letters*, 3(14), 033001. doi:10.1088/1748-9326/aaf8f9
- EESI. (2010). Offshore Wind Energy. Recuperado de https://www.eesi.org/files/offshore_ wind_101310.pdf
- Garanovic, A. (2021, 20 de enero). Floating solar power set for trials off Canary Islands. *Offshore Energy*. Recuperado de <u>https://www.offshoreenergy.biz/floating-solar-power-setfor-trials-off-canaryislands/?fbclid=IwAR0HOX2HPc6R 9c8u1DwgfTirvdWoYcJJ2rIjOv11gu rkWd-U2LoT8dvZg04%C3%A7</u>

- Golroodbari, S. Z., y van Sark, W. (2020). Simulation of performance differences between offshore and land-based photovoltaic systems. *Progress in Photovoltaics Research and Applications*, 28, 873-886. doi:10.1002/pip.3276
- IPCC (2013). Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex P.M. Midgley and (eds.)]. Cambridge: Cambridge University Press y NY: New York.
- IRENA. (2020). Trends in Renewable Energy. Recuperado de <u>https://www.irena.org/Statistics/Vie</u> <u>w-Data-by-Topic/Capacity-and-</u> <u>Generation/Statistics-Time-Series</u>
- Jerez, S., Tobin, I., Vautard, R., Montávez, J. P., López-Romero, J. M., Thais, F., Bartok, B., Christensen, O. B., Colette, A., Déqué, M., Nikulin, G., Kotlarski, S. van Meijgaard, E., Teichmann, C. y Wild, M. (2015). The impact of climate photovoltaic change on power generation Europe. in *NatureCommunications*, *6*, 10014. doi:10.1038/ncomms10014
- López, M., Rodríguez, N. e Iglesias, G. (2020). Combined Floating Offshore Wind and Solar PV. *Journal of Marine Science and Engineering*. 8(8), 576. doi:10.3390/jmse8080576
- Naciones Unidas. (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Recuperado de

https://unctad.org/system/files/officia l-document/ares70d1_es.pdf

- Oceans of Energy. (s.f.). North Sea 1. For more tan one year, we have been operating the first high-wave offshore solar farms in the world!.Recuperado de <u>https://oceansofenergy.blue/northsea-1/</u>
- Oliveira-Pinto, S., Rosa-Santos, P. y Taveira-Pinto, F. (2020). Assessment of the potential of combining wave and solar energy resources to power supply worldwide offshore oil and gas platforms. *Energy Conversion and Management*, 223, 113299. doi:10.1016/j.enconman.2020.11329 <u>9</u>
- Oliveira-Pinto, S. y Stokkermans, J. (2020). Assessment of the potential of different floating solar technologies: Overview and analysis of different case studies. *Energy Conversion and Management*, 211, 112747.

doi:10.1016/j.enconman.2020.112747

- Perkins, S.E., Pitman, A.J., Holbrook, N.J. y McAneney, J. (2007). Evaluation of the AR4 Climate Model's Simulated Daily Maximum Temperature, Minimum Temperature, and Precipitation over Australia Using Probability Density Functions. *Journal of Climate*, 20(17), 4356-4376. doi:10.1175/JCLI4253.1
- Power Technology (2020, 6 de febrero). WindFloat Atlantic Project. Recuperado de <u>https://www.power-technology.com/projects/windfloat-atlantic-project/</u>
- Red Eléctrica de España. (s.f.). Recuperado de
- https://www.ree.es/es/datos/demanda/ev olucion

- Ribeiro, A., Costoya, X., de Castro, M., Carvalho, D., Dias, J. M., Rocha, A. y Gomez-Gesteira, M. (2020). Assessment of Hybrid Wind-Wave Energy Resource for the NW Coast of Iberian Peninsula in a Climate Change Context. *Applied Sciences*, *10*(21), 7395. <u>doi:10.3390/app10217395</u>
- Sanz, J. (2020). The Iberian región as a hub for technology development and industrial leadership in the field of floating offshore wind. Recuperado de https://www.aeeolica.org/images/202 0/Presentacin-EIT-InnoEnergy.pdf
- Solanki, C., Nagababu, G. y Kachhwaha, S.S. (2017). Assessment of offshore solar energy along the coast of India. *Energy Procedia*, *138*, 530-535.<u>doi:10.1016/j.egypro.2017.10.24</u> <u>0</u>
- Soukissian, T. H., Karathanasi, F. E. y Zaragkas, D. K. (2021). Exploiting offshore wind and solar resources in the Mediterranean ERA5 reanalysis data. *Energy Conversion and Management*, 237, 114092.doi:10.1016/j.enconman.202 <u>1.114092</u>
- Tobin, I., Vautard, R., Balog, I., Bréon, F. M., Jerez, S., Ruti, P.M., Thais, F., Vrac, M. y Yiou, P. (2015). Assessing climate change impacts on European wind energy from ENSEMBLES high-resolution climate projections. *Climatic Change*, *128*, 99-112. doi:10.1007/s10584-014-1291-0
- Tonui, J.K. y Tripanagnostopoulos, Y. (2008). Performance improvement of PV/T solar collectors with natural air flow operation. *Solar Energy*, *82*, 1-12.

doi:10.1016/j.solener.2007.06.004

- Williams, J. (2020, 14 de octubre). The benefits of floating wind power. *The Earthbound Report*. Recuperado de <u>https://earthbound.report/2020/10/14/</u> <u>the-benefits-of-floating-wind-power/</u>
- Wu, Y., Li, L., Song, Z. y Lin, X. (2019). Risk assessment on offshore photovoltaic power generation projects in China based on a fuzzy analysis framework. *Journal of Cleaner Production*,215, 46-62. doi:10.1016/j.jclepro.2019.01.024