

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

R. Varela
EPhysLab, CIM-UVIGO
Universidade de Vigo
ruvarela@uvigo.es

Editores

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

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

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

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

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

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

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

M. Gómez-Gesteira
EPhysLab, CIM-UVIGO
Universidade de Vigo
mggesteira@uvigo.es

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

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.

- 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.

Contenido

Impacto del cambio climático en cuatro especies de bivalvos de interés socioeconómico en las Rías Baixas, Galicia. A. Castro-Olivares, M. Des, M. deCastro1

Análisis del recurso solar fotovoltaico *offshore* al oeste de la Península Ibérica. B. Arguilé-Pérez, X. Costoya, M. deCastro18

Determinación del Contenido Total de Electrones (TEC) de la ionosfera en Extremadura. R.G. Meléndez, M. Cruz Gallego, J. Vaquero-Martínez40

Numerical modelling of complex wave energy converter using DualSPHysics. C. Crego-Loureiro, I. Martínez-Estévez, B. Tagliafierro, J.M. Domínguez, A.J.C. Crespo, M. Gómez-Gesteira48

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 a 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 zona, la estratificación, 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 que se encuentra directamente relacionada con el rendimiento, los niveles de actividad y los índices fisiológicos de estos organismos. Además, limita la distribución geográfica de los bivalvos (Sobral y Widdows, 1997). Por lo tanto, un aumento de la temperatura del agua debido al calentamiento global podría llevar a 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) y 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 y empleo (~7.900 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 de concentración representativa: RCP2.6, 4.5, 6.0 y 8.5 (Nailwar y 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 *downscaling*, 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 downscaling 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).

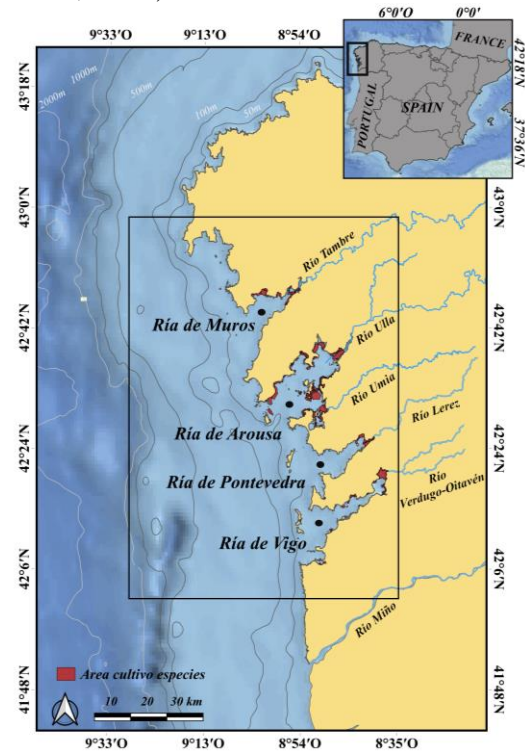


Fig. 1. Área modelada. El rectángulo negro indica el área de estudio.

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 agua superficial, 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 proporcionados por la Secretaría General de Pesca, y los correspondientes a zona de la plataforma adyacente 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 las proyecciones futuras bajo el escenario RCP4.5 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 (Coordinated Regional Climate, <http://www.cordex.org/>). Las salidas del modelo global MOHC HadGEM2-Es, ejecutado dentro del proyecto Climate Model Program of Diagnosis and Intercomparison (CMIP5) (<https://esgf-node.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 del modelo Delft3D-Flow 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).

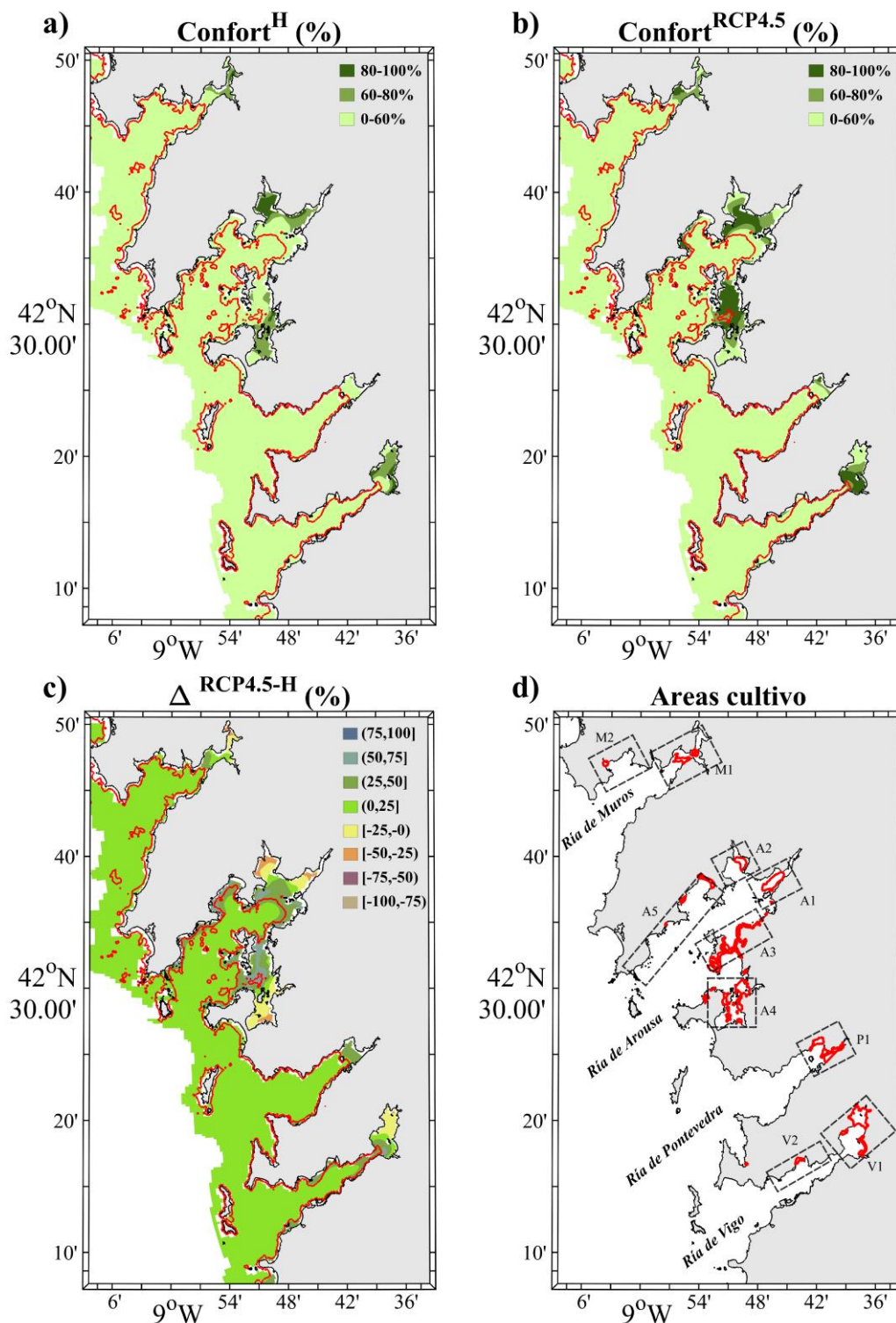


Fig. 2. Porcentaje de tiempo (julio-agosto) durante el cual la temperatura del agua en el fondo está dentro del rango de confort de *R. decussatus* (18-24°C), (a) histórico (1999-2018), (b) futuro (2080-2099), bajo el escenario RCP4.5, (c) diferencia (RCP4.5-Histórico), (d) áreas de cultivo actuales 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 (km ²)	
	H	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 que la 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 al 60% (figura 3bc). La Ría de 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 (km ²)	
	H	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*.

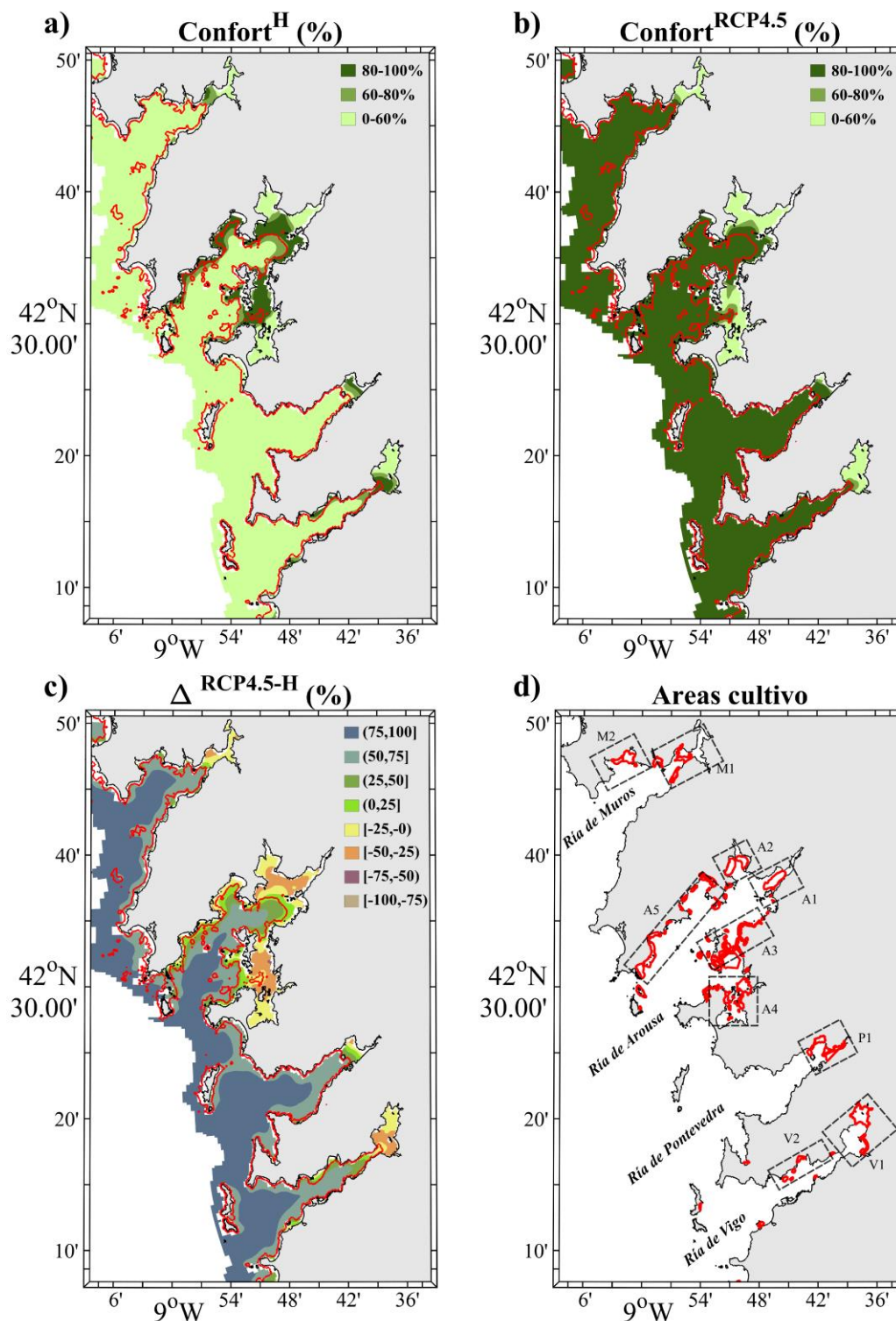


Fig. 3. Porcentaje de tiempo (julio-agosto) durante el cual la temperatura del agua en el fondo está dentro del rango de confort de *V. corrugata* (15-20 °C), (a) histórico (1999-2018), (b) futuro RCP4.5 (2080-2099), bajo el escenario RCP4.5, (c) diferencia (RCP4.5-Histórico), (d) áreas de cultivo actuales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

Ría	Área (km ²)	
	H	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 (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 verano. El análisis de la diferencia 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.

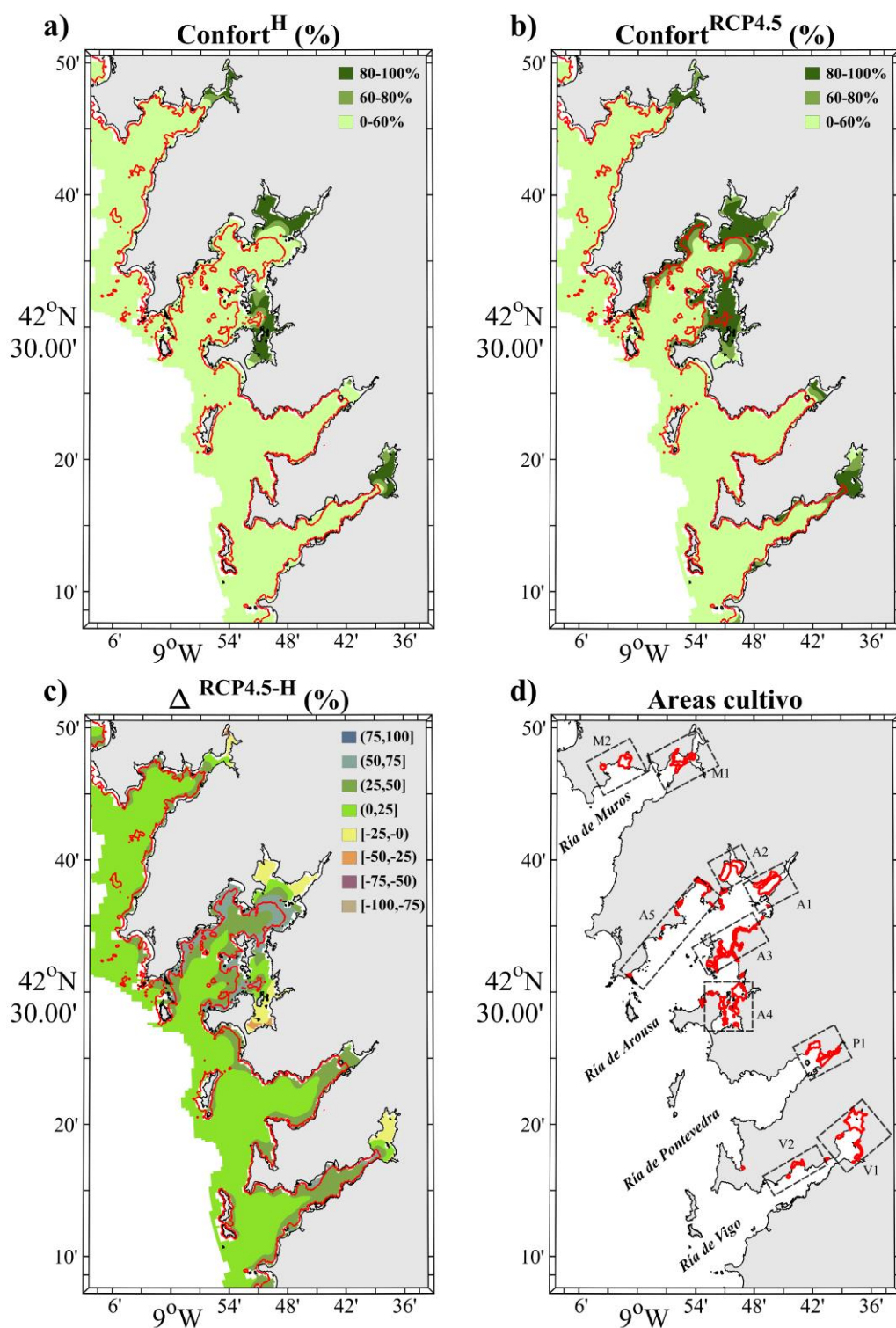


Fig. 4. Porcentaje de tiempo (julio-agosto) durante el cual la temperatura del agua en el fondo está dentro del rango de confort de *C. edule* (17-25 °C), (a) histórico (1999-2018), (b) futuro (2080-2099), bajo el escenario RCP4.5, (c) diferencia (RCP4.5-Histórico), (d) áreas de cultivo actuales de la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

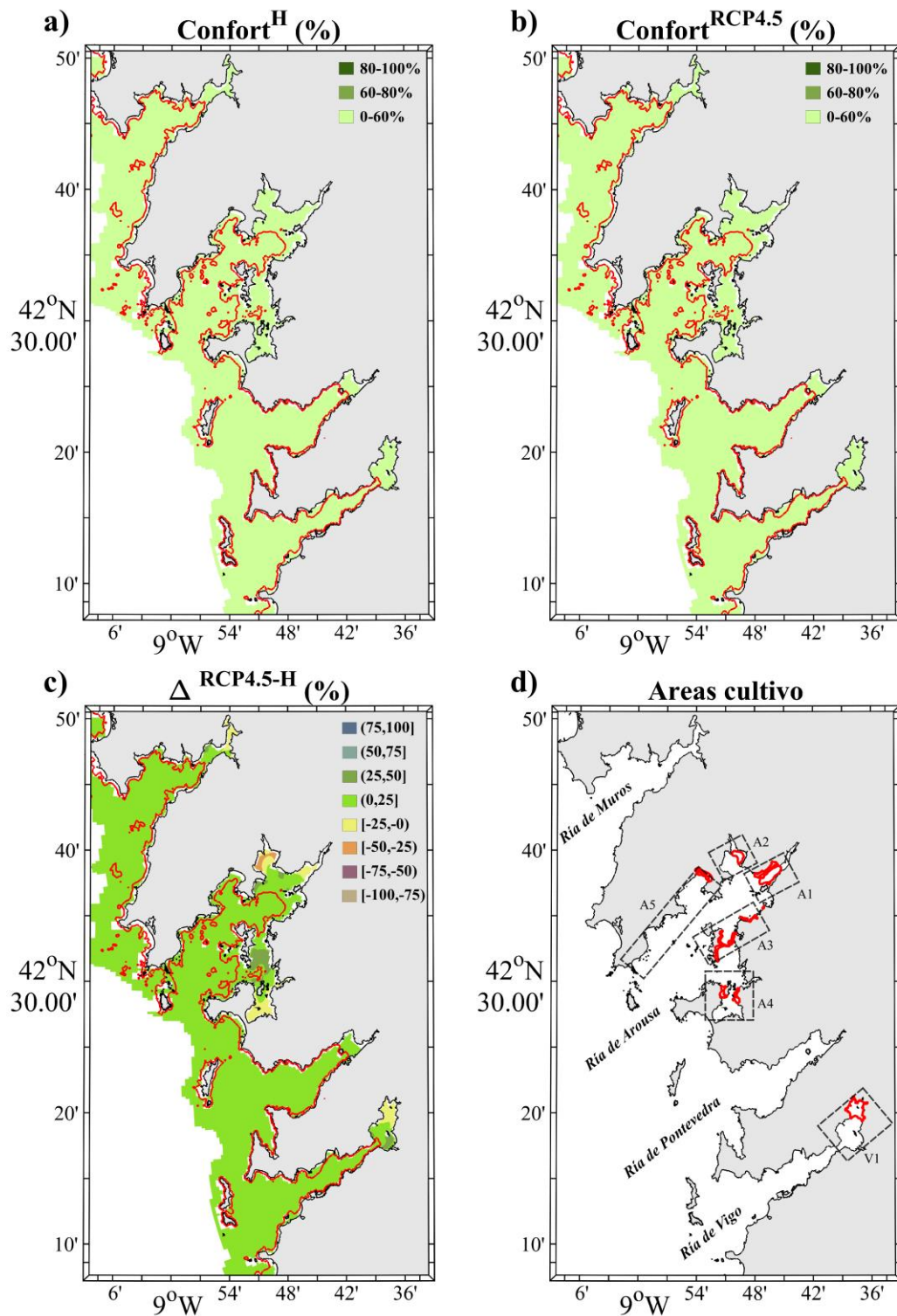


Fig. 5. Porcentaje de tiempo (julio-agosto) durante el cual la temperatura del agua en el fondo está dentro del rango de confort de *R. philippinarum* (20-22 °C), (a) histórico (1999-2018), (b) futuro (2080-2099), bajo el escenario RCP4.5, (c) diferencia (RCP4.5-Histórico), (d) áreas de cultivo actuales 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, ya 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 y 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 proyecciones indican que a finales de siglo la estratificación podría ser mayor (Sousa *et al.*, 2020; Des *et al.*, 2020a) dificultando el ascenso del agua aflorada y la mezcla vertical, y favoreciendo el contraste de temperatura entre zonas externas e internas. La radiación solar es otro factor que motiva las elevadas temperaturas del agua de fondo en zonas someras de las partes internas de las rías y la estratificación. El 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 alimentación y crecimiento, la 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 en las cuatro especies estudiadas, 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 los huevos (Cerviño-Otero, 2011). Además, las temperaturas elevadas aumentan la prevalencia e intensidad de la infección del principal parásito que afecta a las almejas 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* y *V. corrugata* supera el 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, I., deCastro, M., Gomez-Gesteira, M., & Prego, R. (2005). Inter-and intraannual analysis of the salinity and temperature evolution in the Galician Rías Baixas-ocean boundary (northwest Spain). *Journal of 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 change. *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 differing climates. *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 habitat-forming 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 Climatología*. Fernández 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 Ria 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 $\sim 160 \text{ Wm}^{-2}$ en el norte y $\sim 210 \text{ Wm}^{-2}$ en el sur. Este recurso disminuirá en el futuro de forma generalizada ($\sim -0.5\%$ en el futuro cercano y $\sim -1.2\%$ 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 las energías renovables 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% y 21.1%, respectivamente (APPA Renovables, 2021b) (Figura 1).

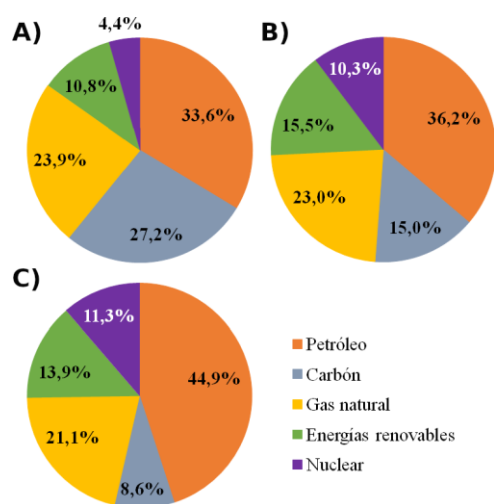


Fig. 1. Porcentaje de consumo de energía primaria (A) mundial, (B) en Europa y (C) en España en el año 2018 [modificado de APPA Renovables (2021a); APPA Renovables (2021b)].

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 buscar medidas 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 corta incidente, aunque factores ambientales como el viento y la temperatura pueden 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 los primeros paneles 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*):

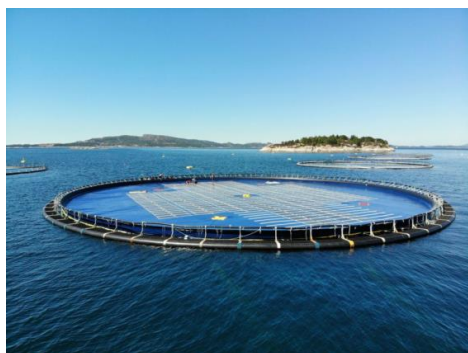


Fig. 2. Planta solar fotovoltaica *offshore* en Noruega (Garanovic, 2021).

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). Como desventajas de la energía fotovoltaica *offshore*, Oliveira-Pinto y Stokkermans (2020) señalan que condiciones adversas de viento y oleaje pueden producir microfisuras 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).

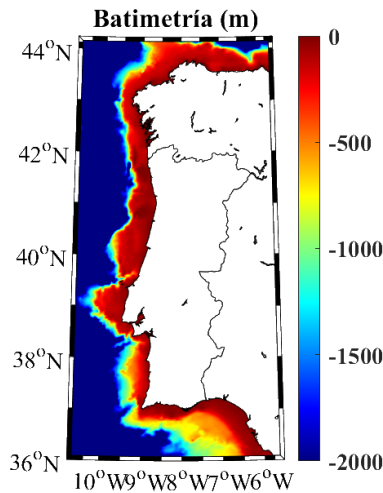


Fig. 3. Batimetría de la región de estudio.

En frente de las costas de Viana do Castelo, en Portugal, las energías renovables en el océano ya 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 que existen en la 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 alimentar los Modelos 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 en <https://esgf-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 bajo el escenario de forzamiento 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 espacio-temporal 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-levels?tab=overview>. Son datos horarios con una resolución espacial de 0.25°×0.25°.

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 :

$$PV = P_R(t) \cdot RAD(t) \quad (1)$$

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} :

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

El coeficiente $\gamma = -0.005^\circ\text{C}^{-1}$ es la eficiencia de conversión de una célula solar de silicio cristalino (Tonui y Tripanagnostopoulos, 2008) y $T_{STC} = 25^\circ\text{C}$ 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):

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

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 $c_1 = 4.3 \text{ }^\circ\text{C}$, $c_2 = 0.943$, $c_3 = 0.028 \text{ }^\circ\text{C m}^2 \text{ W}^{-1}$ y $c_4 = -1.528 \text{ }^\circ\text{C s m}^{-1}$. 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:

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

donde $\alpha_1 = 1.1035$, $\alpha_2 = -1.4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ W}^{-1}$, $\alpha_3 = -4.715 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 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 a las 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_v), y se calcula como

$$M_v = \frac{PV^{MAX} - PV^{MIN}}{PV^{año}} \quad (6)$$

donde PV^{MAX} y PV^{MIN} representan los valores de recurso solar promedio en el mes de mayor y menor PV , respectivamente. $PV^{año}$ 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 se basa en evaluar 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 ejecuta sobre 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 n representa el número de intervalos en los que se divide el rango de valores entre los que oscila la variable.

$$\begin{aligned} \text{Solapamiento}(\%) &= \\ &= \sum_1^n \min(PV_{\text{CORDEX}}, PV_{\text{ERA5}}) \end{aligned} \quad (7)$$

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 los modelos menos dos desviaciones estándar, σ_i :

$$\begin{aligned} \text{Solapamiento}(i) &\geq \\ &\geq \langle \text{Solapamiento}(i) \rangle - 2\sigma_i \end{aligned} \quad (8)$$

En caso de que existiese algún modelo i que no cumpliera 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 ERA5. Analizando el valor del solapamiento variable por variable, también se han encontrado valores medios de solapamiento por encima del 80%. La variable mejor representada es la velocidad del viento, con un porcentaje de solapamiento del 88.93%, seguido de la radiación (85.98%).

Número del modelo	Solapamiento (%)			
	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
Multimodelo	85.98	81.33	88.93	86.20
	±	±	±	±
	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.

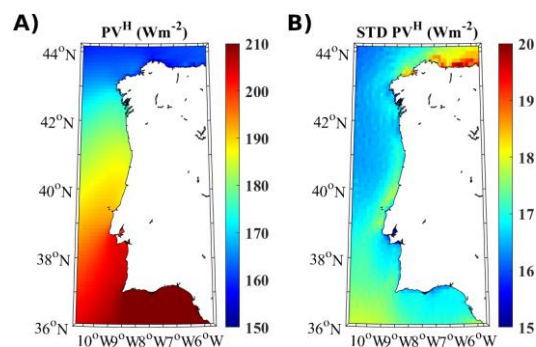


Fig. 4. (A) Recurso solar fotovoltaico anual para el periodo 1990-2019. (B) Desviación estándar para el recurso solar fotovoltaico en el periodo 1990-2019.

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 ($\sim 150 \text{ Wm}^{-2}$) y mayores en el sur ($\sim 205 \text{ Wm}^{-2}$).

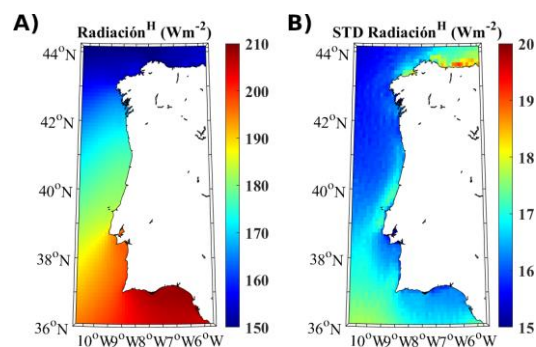


Fig. 5. (A) Radiación anual para el periodo 1990-2019. (B) Desviación estándar de la radiación para el periodo 1990-2019.

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).

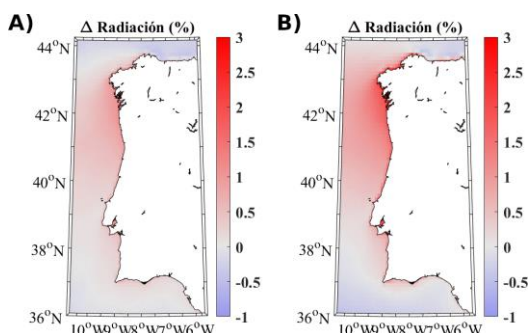


Fig. 6. (A) Porcentaje de variación de la radiación en el futuro cercano (2030-2059). (B) Porcentaje de variación de la radiación en el futuro lejano (2070-2099).

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.

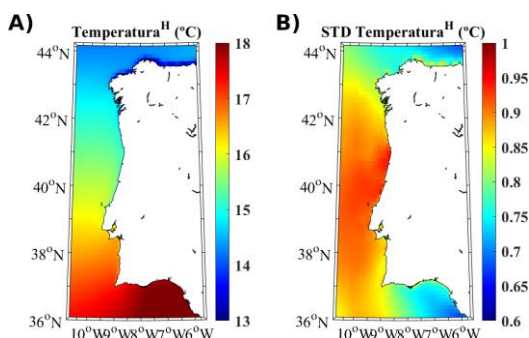


Fig. 7. (A) Temperatura del aire anual para el periodo histórico 1990-2019. (B) Desviación estándar de la temperatura del aire en el periodo 1990-2019.

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.

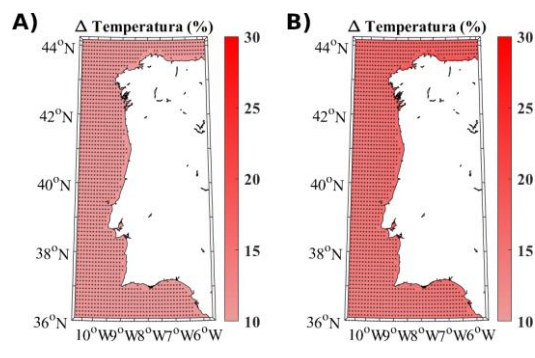


Fig. 8. (A) Porcentaje de variación de la temperatura del aire en el futuro cercano (2030-2059). (B) Porcentaje de variación de la temperatura del aire en el futuro lejano (2070-2099).

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.

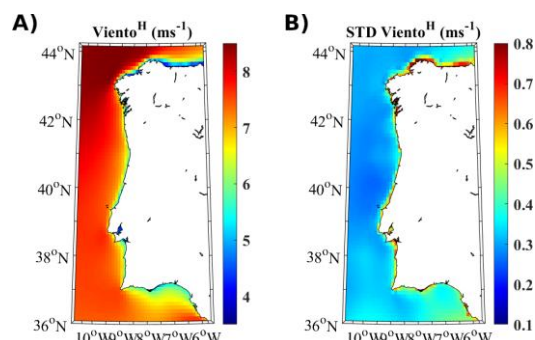


Fig. 9. (A) Velocidad del viento anual para el periodo 1990-2019. (B) Desviación estándar de la velocidad del viento en el periodo 1990-2019.

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 ($\sim -2\%$), donde ya se tenían valores más bajos de la velocidad en el periodo histórico, tal y como se vio en la Figura 9. También 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 ($\sim 4\%$).

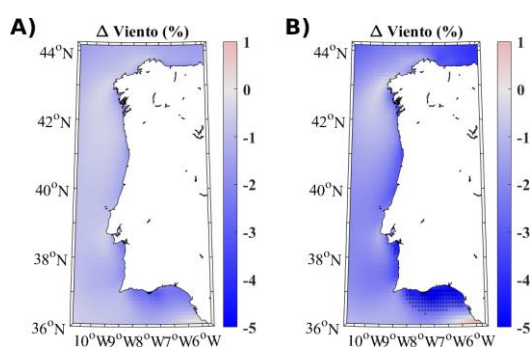


Fig. 10. (A) Porcentaje de variación de la velocidad del viento en el futuro cercano (2030-2059). (B) Porcentaje de variación de la velocidad del viento en el futuro lejano (2070-2099).

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 ($\sim +0.5\%$). En el resto de las regiones disminuirá aproximadamente un 0.5% .

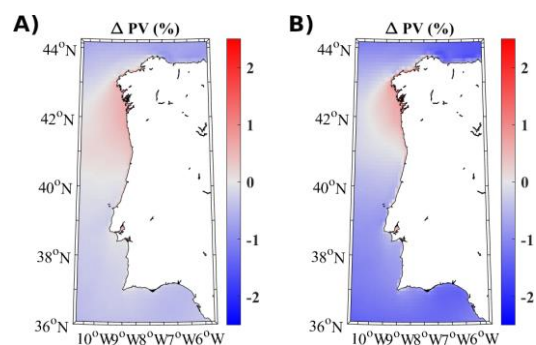


Fig. 11. (A) Porcentaje de variación del recurso solar fotovoltaico en el futuro cercano (2030-2059) y (B) en el futuro lejano (2070-2099).

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 el recurso solar en aproximadamente un 1% (Figura 12B). La variación en la velocidad del viento provocará que el recurso solar disminuya entre un $\sim 0.1\%$ y un $\sim 0.2\%$ (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.

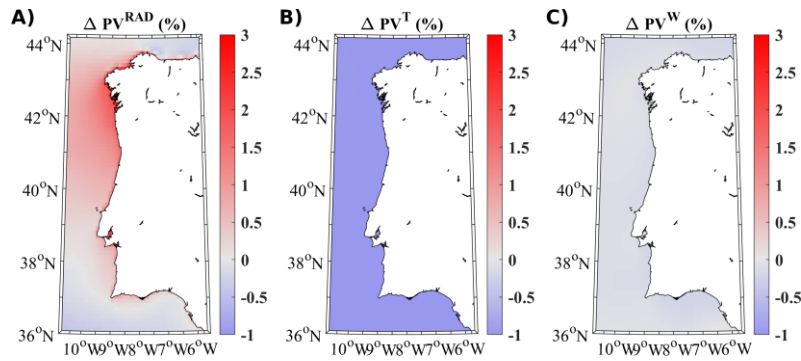


Fig. 12. (A) Peso de la variación en la radiación, la temperatura (B) y el viento (C) sobre el cambio en el recurso solar fotovoltaico en el futuro lejano (2070-2099).

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 realizar una caracterización 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 ($\sim 200 \text{ Wm}^{-2}$) que en el sur ($\sim 250 \text{ Wm}^{-2}$). La estación estival presenta los valores de recurso solar más altos del año climatológico. Existe cierto gradiente latitudinal, pero menos pronunciado que en primavera ($\sim 250 \text{ Wm}^{-2}$ en el norte y $\sim 300 \text{ Wm}^{-2}$ en el sur). En otoño aparece un ligero gradiente latitudinal, con valores de $\sim 170 \text{ Wm}^{-2}$ en el sur y $\sim 140 \text{ Wm}^{-2}$ en el norte.

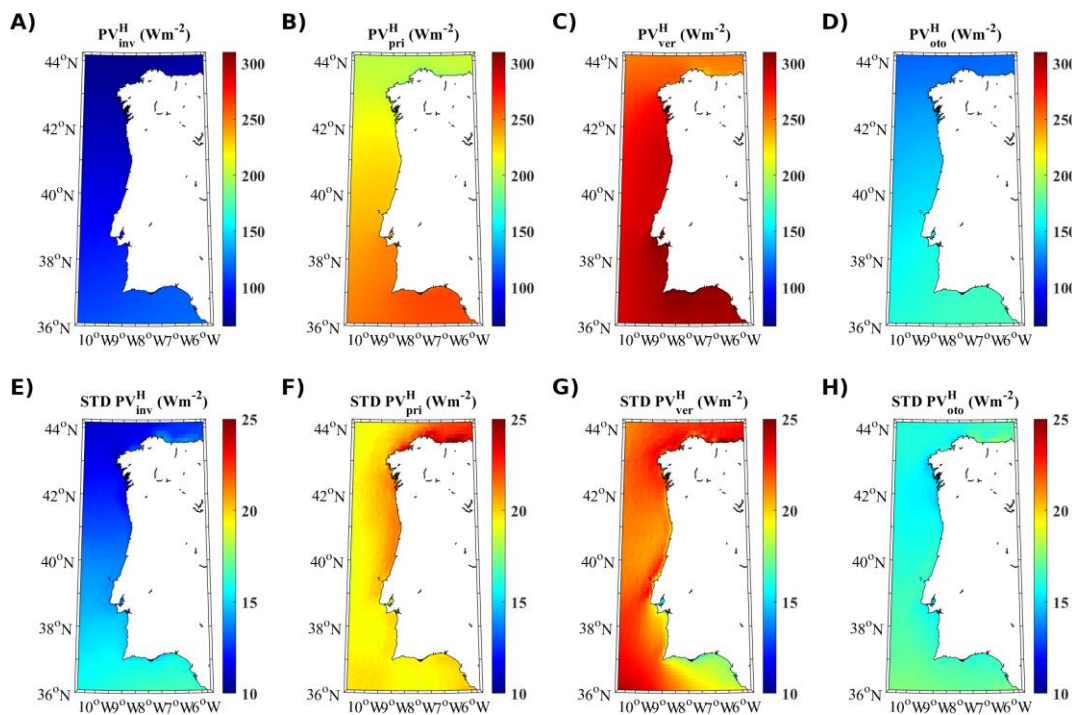


Fig. 13. Recurso solar fotovoltaico estacional para el periodo histórico (1990-2019) y sus desviaciones estándar. (A, E) Invierno (dic-feb), (B, F) primavera (mar-may), (C, G) verano (jun-ago) y (D, H) otoño (sep-nov).

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 $\sim -1.5\%$ en la costa oeste de Portugal y $\sim -2\%$ en Galicia y en el mar Cantábrico. Al sur de la península se espera un incremento del recurso solar del $\sim +0.5\%$. 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 ($\sim -0.25\%$). El noroeste de la Península Ibérica también presentará una disminución en primavera, pero menos acusada que en invierno ($\sim -1.5\%$). En los meses de verano se espera un mayor recurso al noroeste de la Península Ibérica ($\sim 1.5\%$) y una disminución en el sur ($\sim -2\%$). 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 ($\sim +1\%$) y una disminución en el resto de las latitudes ($\sim -1\%$).

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 ($M_v \sim 1.1$), mientras que en la mitad norte el recurso solar es menos estable (valores de M_v más altos, $M_v \sim 1.35$). Las Rías Baixas tienen un recurso solar poco estable en comparación con el resto de las regiones ($M_v \sim 1.4$).

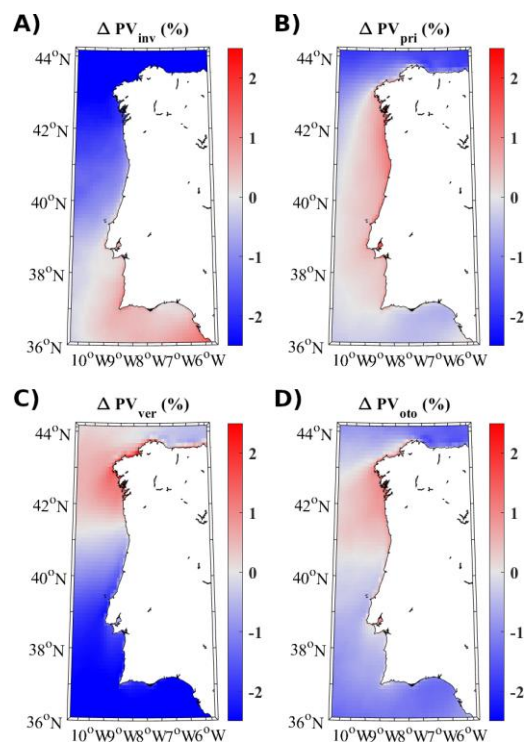


Fig. 14. Variación del recurso solar fotovoltaico en porcentaje durante el (A) invierno, (B) primavera, (C) verano y (D) otoño para el futuro lejano (2070-2099).

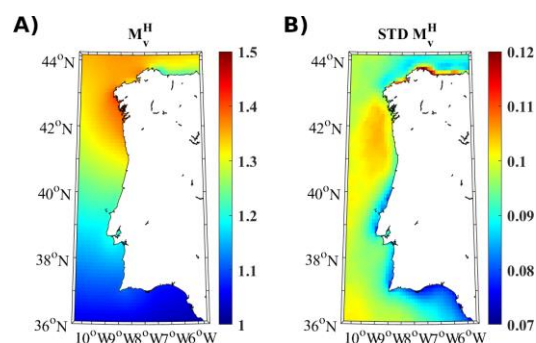


Fig. 15. (A) Índice de estabilidad en el periodo 1990-2019. (B) Desviación estándar del índice de estabilidad.

Se espera un aumento general en la estabilidad del recurso solar ($M_v \sim -1.5\%$) en el futuro cercano (Figura 16A). La estabilidad del recurso únicamente disminuirá al noroeste de Galicia ($M_v \sim +0.5\%$). 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 ($M_v \sim +1.5\%$). La estabilidad del recurso en la mitad sur

aumentará respecto al periodo histórico, pero menos que en el futuro cercano ($M_v \sim -1.3\%$).

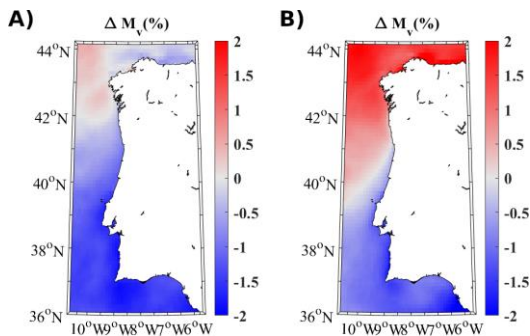


Fig. 16. Variación del índice de estabilidad en porcentaje en (A) el futuro cercano (2030-2059) y (B) el futuro lejano (2070-2099).

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-Pinto y Stokkermans, 2020). Sin embargo, no todas ellas se han desarrollado al mismo nivel. 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 que 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: $\sim 210 \text{ Wm}^{-2}$ en el Golfo de Cádiz y $\sim 220 \text{ Wm}^{-2}$ 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 (unos 155 Wm^{-2} y 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 disminución 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 las principales consecuencias 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 que 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 del recurso 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 gran utilidad combinar 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 et 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.

Otro argumento a favor 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/evolucion>. 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 climático sobre la energía 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 recurso, las simulaciones 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 Terrestre (ESGF) (un esfuerzo 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 a Plazo Medio (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, sub-selection and out-of-sample testing. *Earth System Dynamics*, 10(1), 91-105. [doi:10.5194/esd-10-91-2019](https://doi.org/10.5194/esd-10-91-2019)
- APPA Renovables. (2021a). *Renovables en el mundo y en Europa*. Recuperado de <https://www.appa.es/energias-renovables/renovables-en-el-mundo-y-en-europa/>
- APPA Renovables. (2021b). *Renovables en España*. Recuperado de <https://www.appa.es/energias-renovables/renovables-en-espana/>
- 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 https://www.climate-service-center.de/imperia/md/content/csc/cor-dex/guidance_for_euro-cordex_climate_projections_data_use_2021-02.pdf
- Buljan, A. (2021, 18 de junio). Saitec Unveils Floating Wind Project Off Bilbao. *Offshore Wind*. Recuperado de <https://www.offshorewind.biz/2021/06/18/saitec-unveils-floating-wind-project-off-bilbao/>
- Chenni, R., Makhlouf, M., Kerbache, T. y Bouzid, A. (2007). A detailed modeling method for photovoltaic cells. *Energy*, 32, 1724-1730. [doi:10.1016/j.energy.2006.12.006](https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.12.006)
- 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. [doi:10.1016/j.energy.2019.04.121](https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.121)
- 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](https://doi.org/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 Rías Baixas. *Science of the Total Environment*, 790, 148147. [doi:10.1016/j.scitotenv.2021.148147](https://doi.org/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](https://doi.org/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 <https://www.offshore-energy.biz/floating-solar-power-set-for-trials-off-canary-islands/?fbclid=IwAR0HOX2HPc6R9c8u1DwgfTirvdWoYcJJ2rIjOv1lgu rkWd-U2LoT8dvZg04%C3%A7>

- 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](https://doi.org/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 and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge: Cambridge University Press y NY: New York.
- IRENA. (2020). *Trends in Renewable Energy*. Recuperado de <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series>
- 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 change on photovoltaic power generation in Europe. *Nature Communications*, 6, 10014. [doi:10.1038/ncomms10014](https://doi.org/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](https://doi.org/10.3390/jmse8080576)
- Naciones Unidas. (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Recuperado de <https://un.org/sustainabledevelopment>
- https://unctad.org/system/files/official-document/ares70d1_es.pdf
- Oceans of Energy. (s.f.). *North Sea 1. For more than one year, we have been operating the first high-wave offshore solar farms in the world!*. Recuperado de <https://oceansofenergy.blue/north-sea-1/>
- 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.2020.113299](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113299)
- 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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.1175/JCLI4253.1)
- Power Technology (2020, 6 de febrero). WindFloat Atlantic Project. Recuperado de <https://www.power-technology.com/projects/windfloat-atlantic-project/>
- Red Eléctrica de España. (s.f.). Recuperado de <https://www.ree.es/es/datos/demanda/evolucion>

- 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. [doi:10.3390/app10217395](https://doi.org/10.3390/app10217395)
- 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/2020/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. [doi:10.1016/j.egypro.2017.10.240](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.240)
- 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.2021.114092](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114092)
- 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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.06.004)
- Williams, J. (2020, 14 de octubre). The benefits of floating wind power. *The Earthbound Report*. Recuperado de <https://earthbound.report/2020/10/14/the-benefits-of-floating-wind-power/>
- 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](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.024)

Determinación del Contenido Total de Electrones (TEC) de la ionosfera en Extremadura

Rocío G. Meléndez, María Cruz Gallego y Javier Vaquero-Martínez

rgarciaus@alumnos.unex.es, maricruz@unex.es, javier_vm@unex.es

Departamento de Física, Área de Física de la Tierra, Facultad de Ciencias,
Universidad de Extremadura, Avda. de Elvas s/n, 06006 Badajoz, Spain

RESUMEN

La ionosfera juega un importante papel en las comunicaciones a larga distancia por su papel perturbador en la propagación de las ondas electromagnéticas que la atraviesan. En particular, la ionosfera perturba las señales de doble frecuencia que son emitidas por los Sistemas de Navegación Global por Satélites (GNSS). Por ello, estos sistemas se han convertido en excelentes herramientas de sondeo ionosférico y en una fuente rápida de datos para la obtención del Contenido Total de Electrones (TEC). El presente trabajo utiliza 11 estaciones extremeñas que recogen estas señales del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) para obtener el TEC de la ionosfera de Extremadura para el periodo de estudio 2010-2020 que permite un somero análisis de las características ionosféricas y de la variabilidad del TEC sobre esta región.

Palabras Clave: Ionosfera, Contenido Total de Electrones, Sistema de Posicionamiento Global.

1. Introducción

El parámetro principal de este estudio será el Contenido Total de Electrones (TEC), el cual se define como el número de electrones libres contenidos en el camino que recorre la señal desde el satélite al receptor y viene dado en unidades TECU (1 TECU es igual a 10^{16} electrones/m²; Sardon et al., 1993). Es importante distinguir dos variables:

- *Vertical* TEC (vTEC): está referido al número de electrones contenido en una columna perpendicular al receptor.
- *Slant* TEC (sTEC): está referido al número de electrones contenido en el camino oblicuo que une receptor y satélite.

Dado el número significativo de cargas libres, la ionosfera provoca un retraso, conocido como *retardo ionosférico*, en

las ondas de radio que la atraviesan. En esta parte de la atmósfera ocurren constantes procesos de producción y aniquilación de iones, donde la radiación solar es la principal fuente de energía. Además, se encuentra dividida en capas horizontales en función de su densidad electrónica y produciéndose aumentos en la ionización durante el día y durante una alta actividad solar. La Figura 1 muestra la estructura vertical de la ionosfera, con sus capas.

2. Datos y procedimiento

Los satélites GNSS emiten continuamente dos señales portadoras L_1 y L_2 , con frecuencias $f_1 = 1575,42$ MHz y $f_2 = 1227,60$ MHz, respectivamente. En el tema que se aborda, son interesantes los siguientes grupos de observables de estos satélites:

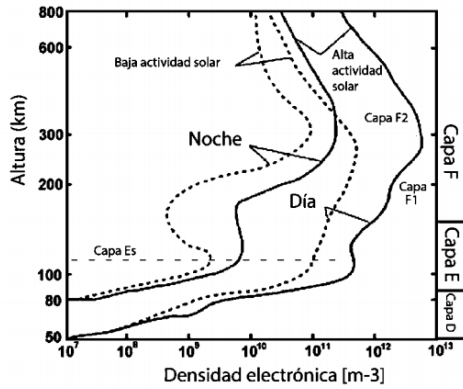


Fig. 1. Perfil típico de densidad de electrones en la ionosfera en función de la hora (las líneas más a la izquierda muestran la correspondiente a la noche y a la derecha durante el día) y de la actividad solar (línea continua corresponde a una alta actividad solar y discontinua a una baja). (Fuente: Tesis doctoral M. Rodríguez).

• **Observables de código**

Los receptores reciben la señal del satélite y generan una réplica de los códigos contenidos en esta señal. Existen, por tanto, dos códigos: el recibido del satélite y el generado por el receptor. Se sincronizan ambos hasta la máxima correlación, y al producto de este desplazamiento temporal por la velocidad de la luz se le conoce como la pseudodistancia R que existe entre satélite y receptor. Sin embargo, en este desfase no solo interviene la desincronización de ambos relojes. También hay que tener en cuenta efectos relativistas, atmosféricos, retardos instrumentales, entre otros, tal que la ecuación para la pseudodistancia se puede expresar como:

$$R_{ij} = \rho_j^i + c\Delta\delta_j^i + d_{trop_i}^j + d_{iono_n,j}^i + dq_n^j + dq_{nj}^i \quad (2.1)$$

donde el superíndice i representa el satélite i , el subíndice j el receptor j y el subíndice n a las frecuencias f_1 o f_2 ; ρ es la distancia geométrica, $\Delta\delta$ la diferencia de tiempos entre relojes, $d_{trop_i}^j$ el retardo correspondiente a la troposfera, $d_{iono_n,j}^i$ el de la ionosfera, y, finalmente, dq_n^j y dq_{nj}^i los retardos instrumentales del satélite y receptor.

• **Observables de fase**

A su vez, existe una diferencia entre la fase de la señal emitida por el satélite y la generada por el receptor, tal que la ecuación de observación para la fase L viene dada por:

$$L_{nj}^i = \rho_j^i + c\Delta\delta_j^i + d_{trop_i}^j - d_{iono_n,j}^i + \lambda_n b_{nj}^i \quad (2.2)$$

Donde λ es la longitud de onda correspondiente a la frecuencia n , y b una constante de inicialización derivada del problema de ambigüedad inicial que aparece en las primeras medidas.

Se puede obtener el retraso correspondiente a la ionosfera combinando las ecuaciones (2.1) y (2.2) obteniéndose la siguiente aproximación para cada frecuencia n (Nayir et al., 2007):

$$d_{iono_n,j}^i = \frac{40.3}{n^2} sTEC_j^i \quad (2.3)$$

donde aparece el término $sTEC$. Sin embargo, el TEC deseado es el TEC vertical, ya que es independiente a la posición del satélite respecto al receptor. Esta conversión la hace posible una función de mapeo y está basada en el Modelo Ionosférico de Capa Simple (SLM) que considera la ionosfera como una capa esférica ‘comprimida’ de espesor infinitesimal y a una altura H desde la superficie de aproximadamente 450 km (Brunini y Azpilicueta, 2008).

2.1. *Obtención de datos*

Para la obtención del TEC mediante observables GNSS se recurren a las técnicas de calibración. La técnica de Ciruolo (1993) plantea que los errores de las dos frecuencias en la banda-L mencionados anteriormente se encuentran en los archivos llamados RINEX. Estos archivos se generan en las estaciones y contienen tres tipos de ficheros: de observación, de navegación y meteorológico. El que nos interesa es

el de observación, donde se encuentran los datos de pseudodistancia y fase para ambas frecuencias P1, L1, P2 y L2. Operando y combinando estas mediciones es posible obtener el retardo ionosférico y, por consiguiente, el TEC. Los archivos RINEX para Extremadura han sido descargados de la página web REP:

http://www.repgnss.es/serv_postPro.php
Desde esta página se facilitan los archivos RINEX con observaciones en código y fase de las constelaciones de satélites GPS y GLONASS de las 11 antenas extremeñas distribuidas por toda la comunidad.

La Tabla 1 presenta las coordenadas geodésicas correspondientes a cada estación, además de la abreviatura (código de 4 letras) con la que nos dirigiremos a ellas en adelante.

TABLA 1. Coordenadas geodésicas ETRS89 y abreviaturas de las 11 estaciones extremeñas pertenecientes a la REP.

Estación	Coordenadas	Abreviatura
Badajoz	6° 59' 21,32993" W 38° 53' 37,2817" N	badj
Castuera	5° 32' 19,65534" W 38° 43' 49,5507" N	catu
Cáceres	6° 22' 40,50153" W 39° 28' 20,2684" N	ccex
Coria	6° 31' 10,71264" W 39° 58' 53,8326" N	cori
Herrera del Duque	5° 3' 0,10758" W 39° 10' 53,1781" N	herr
Jerez de los Caballeros	6° 46' 45,96317" W 38° 19' 12,1507" N	jere
Llerena	6° 0' 38,56550" W 38° 14' 12,4138" N	ller
Mérida	6° 20' 54,81554" W 38° 54' 58,6035" N	meda
Navalmoral de la Mata	5° 32' 4,42831" W 39° 53' 41,4656" N	nava
Trujillo	5° 51' 20,15014" W 39° 28' 47,3394" N	truj
Valencia de Alcántara	7° 14' 53,82803" W 39° 24' 27,3906" N	valc

En REP existen datos desde noviembre de 2009 hasta la actualidad,

renovándose diariamente. Este trabajo engloba el periodo de años desde 2010 hasta 2020, ambos incluidos.

Mediante archivos por lotes se han ido descargando los ficheros con secuencias temporales de 30 segundos, y después han sido comprimidos en formato Hatanaka, para su posterior paso por el software.

2.2. Obtención del TEC mediante Ionolabtec

El software utilizado para la obtención de valores del TEC mediante procesado de datos GPS recibe el nombre de Ionolabtec, del sitio web <http://www.ionolab.org/>.

Este software está basado en JAVA y, mediante el uso de datos de efemérides de satélite, ficheros RINEX y ficheros IONEX facilitados por los centros IGS (International GPS Service for Geodynamics), proporciona al usuario estimaciones de TEC con una resolución temporal de 30s, dada una fecha y estación (Nayir et al., 2007).

3. Resultados

3.1. Comparación con los datos de EarthDATA

A modo de garantizar unos óptimos resultados, se han comparado los datos obtenidos en este trabajo con los datos que proporciona la página <https://earthdata.nasa.gov/>.

En esta página web se ofrecen mapas TEC globales en intervalos de dos horas y con una resolución de 2.5° en latitud y 5° en longitud, por lo que se puede considerar Extremadura entera en un solo pixel: las coordenadas geográficas de la comunidad son 39,17° en latitud y -6,17° en longitud (ETRS89). Aproximando en el formato que ofrece la página, se eligen los valores del TEC correspondientes a 40° en latitud y -5° en longitud.

En las Figuras 2 y 3, se constatan las dos series de datos promediados al día

durante el año 2014, ya que es el año de máxima actividad solar del pasado ciclo solar 24, que dura un promedio de 11 años: en la primera Figura (Figura 2) aparecen los datos de las 11 estaciones, y en línea continua, para una mejor

visualización, el valor del TEC de EarthDATA.

En la Figura 3, se representa en verde el TEC proporcionado por la anterior página web y en naranja la media del TEC de las 11 estaciones, junto con el error estimado de esta media.

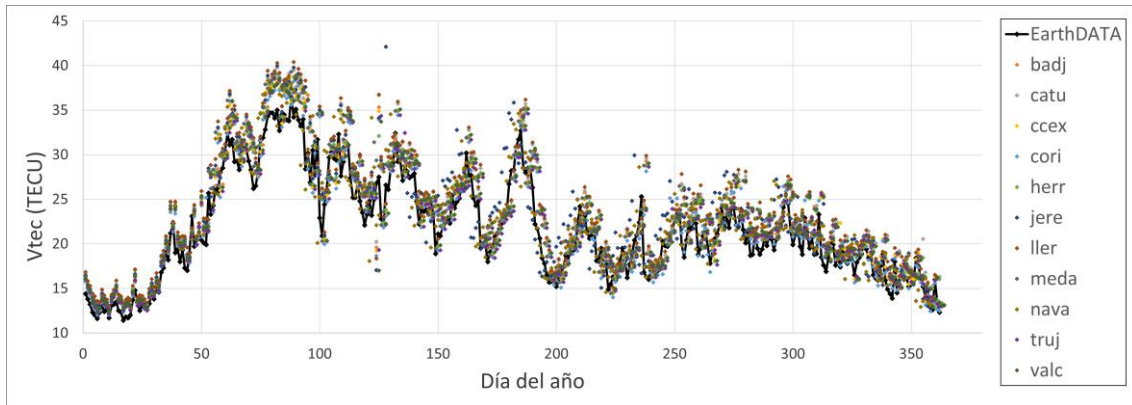


Fig. 2. Valores del TEC promediados al día para el año 2014 de las 11 estaciones extremeñas junto con los datos de EarthDATA.

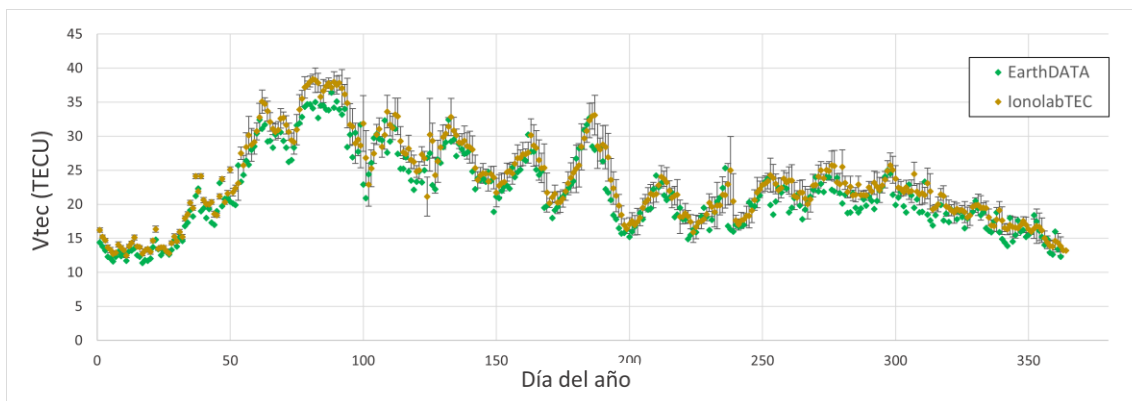


Fig. 3. Comparación de las dos series de datos del TEC promediados al día para el año 2014.

Se puede observar que la variabilidad de las series es bastante parecida en ambas gráficas. En ocasiones, el valor del TEC de EarthDATA no entra en el intervalo de error calculado por nuestro software, probablemente por la aproximación hecha en las coordenadas espaciales. Como se ha visto, el TEC es un parámetro que depende de bastantes factores, por ello, es interesante analizar cómo se comporta en función de ellos.

3.2. Variabilidad diaria del TEC

El contenido total de electrones se ve afectado por los cambios debidos a la rotación de la Tierra, variando durante el día. En la Figura 4 se han representado los valores del TEC frente a cada hora diaria, para las 11 estaciones.

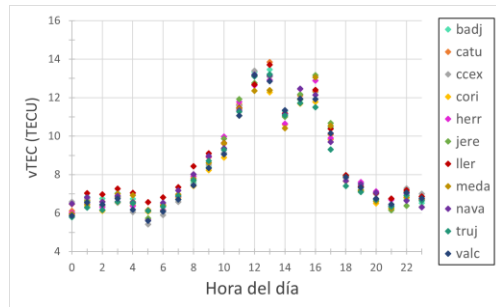


Fig. 4. A modo de ejemplo, valores del TEC para cada hora de todas las estaciones del día 1 de enero de 2017.

Según la ecuación de Chapman que propuso en 1931, el ritmo de producción de iones es proporcional al ángulo cenital del Sol, de tal forma que existe más ionización cuando el ángulo es pequeño, y por ello se producen máximos en las horas del día en las que el Sol se encuentra en nuestra vertical (Rodríguez, 2017). Además, se aprecian los mínimos durante la noche ya que no existe fotoionización y vemos que, efectivamente, las 11 estaciones siguen el mismo comportamiento.

3.3. Variabilidad espacial del TEC

La posición relativa del Sol respecto a la atmósfera también juega un papel importante en los cambios de densidad ionosférica, por lo que existirá también una variabilidad espacial, principalmente respecto a la latitud.

En este trabajo la variabilidad espacial entre las estaciones es prácticamente despreciable, pues la diferencia en latitud de Extremadura se aproxima a los $2,5^\circ$. Sin embargo, sí que existe diferencia a escala global: el ángulo cenital del Sol determina cuánto de directos entran sus rayos en la atmósfera, y con ello el grado de ionización, por lo que aquellas zonas con ángulos pequeños (latitudes bajas) se encuentran expuestas a una mayor tasa de radiación.

Como se puede apreciar en la Figura 5, esta zona se extiende hasta los 15° alrededor del Ecuador debido a la

anomalía de Appleton, causado por efectos de campo eléctrico y magnético (Ezquer y Radicella, 2008). Además, la ionosfera de media y alta latitud también son sensibles a perturbaciones de origen solar, encontrándose ambas en actual estudio.

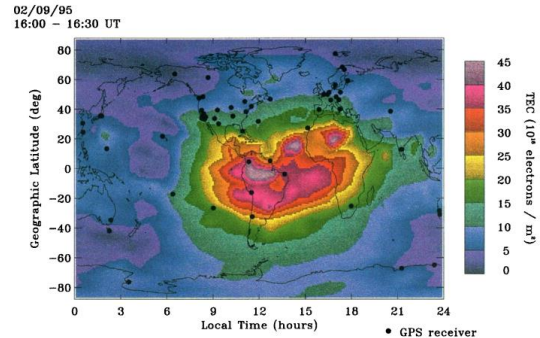


Fig. 5. Mapa TEC global del 9 de febrero de 1995. Se utiliza falso color para representar valores de vTEC en un rango de latitud que se extiende desde -80° a $+80^\circ$, cubriendo todas las longitudes, durante el periodo 16:00-16:30 UTC. (Fuente: Mannucci et al., 1998)

3.4. Variabilidad estacional del TEC

Se ha estudiado la variabilidad anual de la ionosfera terrestre utilizando el TEC, demostrando la existencia de una asimetría equinoccial: resulta un aumento en el TEC para primavera y otro para otoño, coincidiendo con los equinoccios, donde los rayos solares penetran perpendicularmente en la atmósfera. Este crecimiento se intensifica con el incremento de la actividad solar, por lo que en la Figura 6 se representan las variaciones anuales promediadas diariamente correspondientes a los años 2014, 2016 y 2019 que son los años de actividad solar máxima, intermedia y mínima, respectivamente, del pasado ciclo solar. En esta gráfica se puede observar la asimetría equinoccial, siendo mayor el pico en el equinoccio de primavera, probablemente debido a que nos encontramos en el hemisferio norte, primavera en esta época. Además, la variabilidad de la serie en los distintos meses es muy parecida todos los años, lo cual indica que existe estacionalidad.

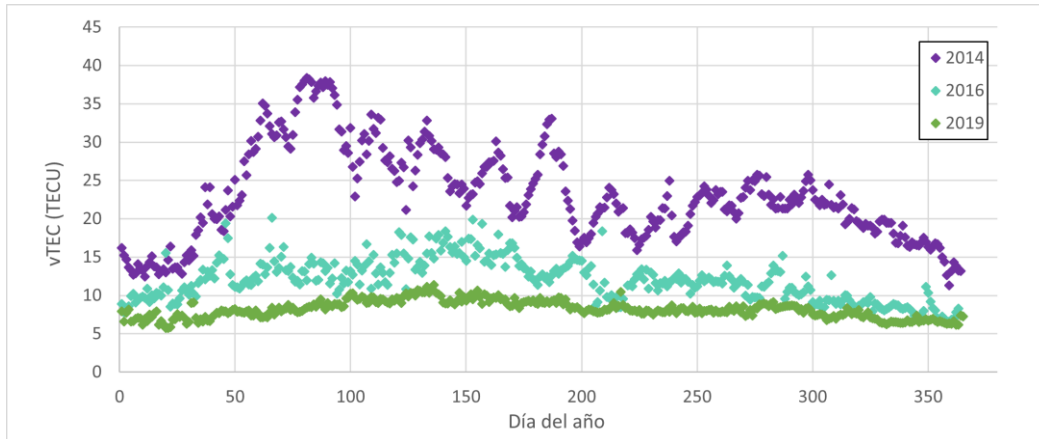


Fig.6. Valores del vTEC promediados diariamente para 2014, 2016 y 2019

3.5. Variación del TEC con la actividad solar

La actividad solar es un concepto que nos indica las pequeñas variaciones que sufre la energía emitida por el Sol a lo largo del tiempo. Su rasgo más visible es la aparición y desaparición de zonas oscuras en la fotosfera solar, con un periodo medio de 11 años, que conocemos como ciclo solar. El índice más utilizado para caracterizar la actividad solar es el número de manchas solares o Sunspot Number Index (Muñoz-Jaramillo y Vaquero, 2019).

Estos datos se encuentran disponibles en la página web de Sunspot Index and Long-term Solar Observations (SILSO): <http://sidc.be/silso/home>.

Por tanto, existirá una relación entre la radiación emitida por el Sol, que incidirá en el tope de la atmósfera terrestre con un valor determinado de irradiancia, y el TEC en la ionosfera.

El último ciclo solar fue el número 24, que comenzó en enero de 2009 y acabó en diciembre de 2019.

La Figura 7, obtenida de SILSO, muestra el Sunspot Number en esos años y se puede comprobar que el máximo de actividad solar del último ciclo completo fue en 2014.

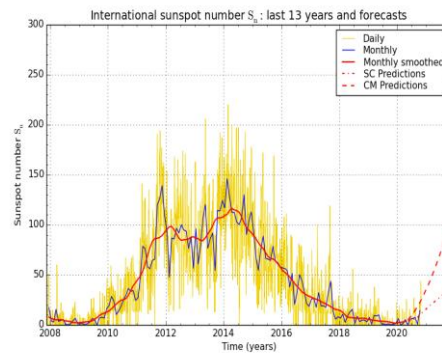


Fig.7. Valores diarios, mensuales y mensuales suavizados del Sunspot Number para el último ciclo 24. (Fuente: SILSO)

La Figura 8 refleja el vTEC diario promediado de las 11 estaciones extremeñas, alcanzando su pico en 2014 con un máximo de 38 TECU.

Comparando ambas gráficas, se observa que el TEC tiene la misma tendencia que el flujo solar, lo que indica claramente la correlación esperada entre el TEC y la actividad solar.

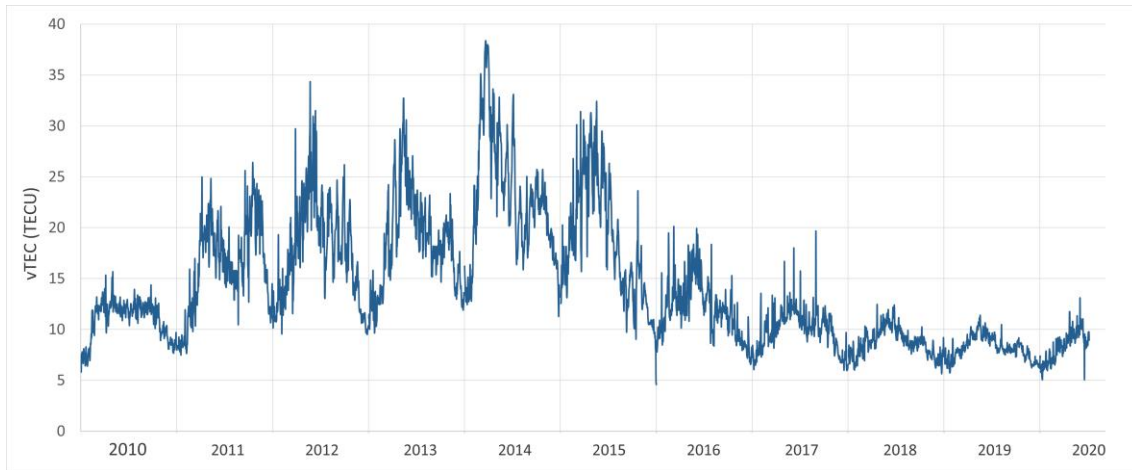


Fig. 8. Valores diarios del vTEC para el periodo de años 2010-2020

4. Estudio de casos

La página [SpaceWeatherLive](https://www.spaceweatherlive.com/) <https://www.spaceweatherlive.com/> ofrece multitud de información y noticias sobre el clima espacial. Entre estos datos sobre la actividad auroral y solar, distingue las tormentas geomagnéticas más importantes de cada año. A continuación, se verá si existe relación con el vTEC obtenido y si es concluyente.

En el año 2014, el mes de febrero fue el más afectado por estas tormentas, alcanzando la de mayor intensidad el día 19. En la Figura 9 se representa la anomalía del vTEC promediado para cada día de este mes.



Fig. 9. Valores de la anomalía del vTEC promediado de todas las estaciones para cada día del mes de febrero de 2014. Aparecen señalados los días en los que SpaceWeatherLive indica en su página que hubo una tormenta.

Se puede comprobar que aparecen picos en el TEC en los días en los que se detectó una tormenta. Sin embargo, el día de máximo TEC (día 27) no coincide con la tormenta más fuerte (día 19).

Para este día 19 se ha hecho un control horario: la página indica que el índice Kp, índice de actividad geomagnética, comenzó a aumentar a partir de las 6h, decreciendo sobre las 12h y con un pequeño aumento a las 15h.

La gráfica de la Figura 10 indica el vTEC promediado para cada hora de ese día, mostrando una variación parecida, lo que indica que puede existir una relación entre el TEC y el clima espacial, en concreto, con las tormentas geomagnéticas. Sin embargo, se ha visto que este parámetro depende de muchos factores (ubicación geográfica, actividad solar...) y sería muy atrevido afirmar que las curvas obtenidas no dependan de uno o varios de ellos.



Fig. 10. Valores del vTEC promediado de todas las estaciones para cada hora del día 19 de febrero de 2014.

5. Conclusiones

Este trabajo presenta los resultados de un estudio del vTEC sobre el territorio extremeño haciendo uso de las 11 estaciones GNSS de la comunidad, que facilitan los archivos RINEX necesarios. Se pueden obtener ciertas conclusiones: el TEC de la ionosfera de la Tierra puede determinarse a partir de mediciones de código y fase de las señales de los receptores GNSS de doble frecuencia, permitiendo crear mapas ionosféricos globales o locales. Además, se ha comprobado que la concentración de electrones se ve afectada por el ángulo cenital del Sol, su distancia y penetración de los rayos en la atmósfera, produciéndose máximos y mínimos durante un mismo día, y un máximo en el equinoccio primaveral. Además, la variación en la posición geográfica también provoca fluctuaciones en el TEC, e incluso el flujo solar tiene un control directo sobre la ionosfera. Esto conlleva que estos parámetros se puedan utilizar para investigar más a fondo la variabilidad ionosférica.

Agradecimientos

Los autores del presente artículo agradecen a J.M. Vaquero la idea original del trabajo y las sugerencias durante el desarrollo del mismo. También agradecen a la REP la disponibilidad de archivos RINEX, los cuales han sido imprescindibles para la realización del presente trabajo, a IONOLAB por su programa Ionolabtec, a EarthDATA por posibilitar los mapas TEC y a SILSO por facilitar los datos de manchas solares.

Referencias

- Brunini, C. y Azpilicueta, F. (2008) Evaluación experimental de la corrección ionosférica y de su integridad para un sistema tipo sbas en centro y sur américa. *Física de la Tierra* **20**, 83–98.
- Ciraolo, L., 1993. Evaluation of GPS I2-11 biases and related daily TEC profiles. Neustrelitz, Germany.
- Ezquer, R.G. y Radicella, S.M. (2008) Ionosfera de bajas latitudes: efectos sobre señales de satélites recibidas en Tucumán. *Física de la Tierra* **2**, 61–81.
- Mannucci, A.J., Wilson, B.D., Yuan, D.N., Ho, C.H., Lindqwister, U.J., Runge, T.F. (1998) A global ionospheric total electron content measurements. *Radio Science* **33(3)**, 565–582.
- Muñoz-Jaramillo, A. and Vaquero, J.M. (2019) Visualization of the challenges and limitations of the long-term sunspot number record. *Nature Astronomy* **3**, 205–211.
- Nayir, H., Arikan, F., Arikan, O., Erol, C.B. (2007) Total electron content estimation with Reg-Est. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **112**, A11313.
- Rodríguez, M. (2017) Estudio de perturbaciones ionosféricas a través del contenido total de electrones en Europa meridional. Tesis doctoral, Departamento de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica I (Geofísica y Meteorología). Universidad Complutense de Madrid.
- Sardon, E., Rius, A., Zarraoa, N. (1993) Estimación del contenido total de electrones en la ionosfera usando datos del sistema de posicionamiento global. *Física de la Tierra* **5**, 167-182.

Numerical modelling of complex wave energy converter using DualSPHysics

C. Crego-Loureiro*, I. Martínez-Estévez, B. Tagliafierro, J. M. Domínguez, A. J. C. Crespo, M. Gómez-Gesteira

**ccrego@alumnos.uvigo.es*

*EPhysLab (Environmental Physics Laboratory), Facultade de Ciencias,
Universidade de Vigo,
Campus As Lagoas s/n, Ourense, Spain*

ABSTRACT

Wave energy has been introduced as a feasible alternative to fossil fuels in the near future and presents zero emissions of greenhouse effect gases. However, a dominant technology for capturing wave energy with clearly superior efficiency among others has not been established yet. When this happens, this type of energy will be considered profitable and, hence, worthy of being developed for big industries.

Throughout this article, the usefulness of numerical modelling in helping in the design of efficient wave energy converters will be analysed. The study is focused on the FOSWEC (Floating Oscillating Surge Wave Energy Converter) developed by SANDIA National Laboratories, United States. This device is extremely complex since it has different floating parts, mooring lines which attach the structure to the bottom of the ocean (or pool in the tests) and the power take-off (PTO) system in the flaps used to gather energy. This complexity sets as a significant challenge for the validation of the FOSWEC using a unitary numerical tool.

Thanks to the validation of the R5C experiment by SANDIA using the SPH solver DualSPHysics, it is proved that this model is capable of reproducing the behaviour of the FOSWEC interacting with regular waves. Once the numerical tool has been validated, an efficiency study is carried out in order to obtain optimal configurations of wave conditions and PTO configurations, obtaining results in significantly less time than the required one on fabrication process and experimental tests.

Keywords: wave energy converter, numerical modelling, computational fluid dynamics, smoothed particles hydrodynamics, DualSPHysics.

1. Introduction

According to Falnes (2007), the world power consumption nowadays is in the order of 10 TW (10^{13} W). It has been estimated that seas and oceans could be capable of supplying this all power if marine energies got to be efficient (IDEA, 2011).

At present, there are thousands of devices, already patented, which aim to capture kinetic energy carried by waves on their movement (wave energy). However, it has not been set yet as a dominant type of technology that can manifest a clear higher efficiency above the other. The technological growth of this energy is a major challenge since it

is an energy source with huge potential and at an early-development phase.

The devices that can harness the wave energy are called Wave Energy Converters (WEC) and despite the benefits that marine energies have (non-pollute, great energy potential, etc.), the pursuit of a specific WEC, which may remain above the rest in efficiency, it is not an easy task.

This is because the device's production implies elevated costs not only in the phase of creating the WEC, but also in the investment to build the facilities where the device will be tested. Due to this, and thanks to the massive growth of computers for calculation, tools based on Computational Fluid Dynamics (CFD) are playing an essential role in the research and evolution of these energy converters.

The most popular CFD methods are the mesh-based ones, which often use Finite Volume Element methods to discretize the domain. However, these methods have difficulties when discretizing complex moving geometries such as WECs and cases with large deformations of fluid free surfaces such as ocean waves interacting with floating offshore devices.

Mesh-free methods are still under development, however, they have awakened an increasing interest over the last few years due to their capability of being easily applied to non-linear problems with complex geometries. Unlike mesh-based methods, mesh-free methods do not require a special algorithm to detect constantly the free surface of the fluid and, the absence of a mesh, allows the method to manage simulations with significant free surface deformations obtaining accurate results.

Therefore, the mesh-free method called Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) will be used for our study. The SPH method was developed during the 1970s to solve problems of astrophysics (Monaghan, 1992). However, this mesh-less method has become very popular over the last few years in CFD problems (Violeau and Rogers, 2016) and provides accuracy comparable to more traditional mesh-based methods (González-Cao *et al.*, 2018). This method has already been successfully used in numerous studies and engineering fields (Shadloo *et al.*, 2016; Gotoh and Khayyer, 2018; Manenti *et al.*, 2019; Luo *et al.*, 2021).

The DualSPHysics model is a free software (Domínguez *et al.*, 2021) based on the SPH method. It is mainly focused on interaction applications between waves and fixed or floating structures. Therefore, it includes several approaches to wave generation (Altomare *et al.*, 2017; Altomare *et al.*, 2018; Domínguez *et al.*, 2019a; Verbrugge *et al.*, 2019) and coupling with other models such as Project Chrono that allow the simulation of complex mechanisms (Canelas *et al.*, 2018) and MoorDyn for modelling of moorings (Domínguez *et al.*, 2019b). Recently, DualSPHysics has also been successfully applied for the simulation of WECs (Crespo *et al.*, 2017; Brito *et al.*, 2020; Roper-Giralda *et al.*, 2020; Quartier *et al.*, 2021; Roper-Giralda *et al.*, 2021). Therefore, DualSPHysics has been positioned as a useful tool in the simulation of different types of WECs.

SANDIA National Laboratories has recently developed a new energy converter named Floating Oscillating Wave Energy Converter (FOSWEC) (Coe *et al.*, 2020). The FOSWEC is a complex design, which would be very challenging to be simulated with any CFD tool. The device includes a floating body that is attached to the

bottom of a basin with mooring lines and two flaps. The power take-off (PTO) system is based on the angular motion along the hinges that connect the flaps to the main body.

The main objective of this study is to prove that the DualSPHysics software is capable of simulating such a complex wave energy converter like the FOSWEC. Some physical tests will be reproduced with the numerical tool comparing the results with the ones obtained by SANDIA in their facilities. Next, an efficiency study will be carried out with the validated tool, considering the action of different wave conditions and different PTO systems of the FOSWEC.

The present article is organised as follows: Section 2 describes the SPH methodology and the DualSPHysics software; Section 3 presents the validation for the R5C physical test carried out in SANDIA and the explanation of the numerical setup used for this validation; Section 4 includes the efficiency study for different wave periods and several PTO configurations; and Section 5 discusses the main conclusions of this work and the lines for future work.

2. Numerical modelling.

During the last decades, numerical modelling has stirred up every field of science. The technological growth that computers have experienced throughout the last years allows scientists to do simulations of complex systems in a reasonable time, being more and more accurate and avoiding the costs associated with the physical modelling.

The interaction between WECs and ocean waves is a complex problem. The CFD method will be then employed

to simulate this phenomenon. CFD methods will consider viscous forces and high non-linear features of the wave-structure interaction. CFD are based on the integration of the Navier-Stokes equations, which include the continuity and momentum conservation laws:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{d\vec{v}}{dt} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right) = -\nabla p + \nabla f_{viscous} + \vec{f}_{ext} \quad (2)$$

where ρ is density, v is velocity vector, p is the pressure and f forces.

In order to solve these equations, a mesh-free software such as DualSPHysics will be used.

2.1. Smoothed Particle Hydrodynamics

In the SPH method, the domain is discretized into a set of particles (or nodal points), where the values of the physical properties of each particle (position, velocity, density and pressure) can be obtained by local interpolation of the properties of the surrounding particles. The Navier-Stokes equations are solved during the particle interactions and the contribution of the neighbouring particles is given using a kernel (or weighting) function, for which a smoothing length or radius of interaction is defined.

Following, the different theoretical fundamentals of the SPH method are introduced.

2.1.1. Kernel function.

The interpolation procedure in SPH is based on the approximation of the value of a variable A placed at a point $\vec{x} \in \Omega$, where Ω is an enclosed domain in \mathbb{R}^3 , knowing the value of its surrounding

points $\vec{\xi} \in \Omega$. According to this the value of the variable A placed at \vec{x} is:

$$\langle A(\vec{x}) \rangle = \int_{\Omega} W(\vec{x} - \vec{\xi}, h) A(\vec{\xi}) d\Omega(\vec{\xi}) \quad (3)$$

where W is a function called *kernel*, which depends on the distance between particles $\vec{r} = \vec{x} - \vec{\xi}$, and the smoothing length. The influence of the kernel (or its radius of interaction) is usually defined as h .

The kernel function is represented in *Figure 1* being n a number that defines the radius of influence of the kernel ($n=1, 2, 3$, etc).

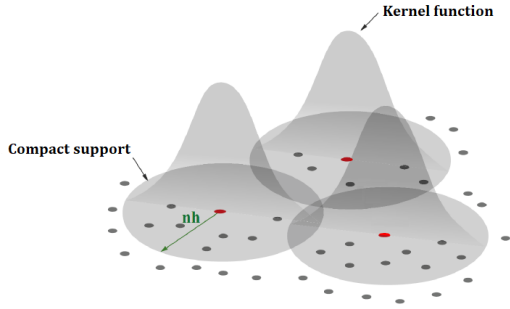


Figure 1. Representation of the kernel function.

The expression (3) can now be translated into its discrete form using the kernel function (W). The particle of interest is denoted by i and the N neighbouring particles are denoted by j . We also consider that the volume of a particle j (V_j) can be defined as a function of its mass and density $V_j = f(m_j, \rho_j) = (m_j/\rho_j)$:

$$A_i = \sum_{j=1}^N A_j W_{ij} \frac{m_j}{\rho_j} \quad (4)$$

where $W_{ij} = W(\vec{r}_{ij}, h)$, with $\vec{r}_{ij} = \vec{r}_i - \vec{r}_j$.

2.1.2. Governing equations

The continuity (or mass conservation) equation of Navier-Stokes (1) can be

written in SPH formalism as a summation:

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial t}\right)_i = \sum_{j=1}^N m_j (\vec{v}_i - \vec{v}_j) \cdot \nabla_i W_{ij} \quad (5)$$

On the other hand, momentum conservation equation of Navier-Stokes may be rewritten from (2) into discrete notation as:

$$\left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t}\right)_i = - \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{p_j}{\rho_j^2} + \frac{p_i}{\rho_i^2}\right) \nabla_i W_{ij} + \vec{g} \quad (6)$$

2.1.3. Equation of state

In addition to previous equations, the solver uses an equation to relate density and pressure. This equation (7) is defined as an equation of state and is given by the work of Monaghan and Kos (1999) and Batchelor (1974).

$$p = b \left(\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right) \quad (7)$$

where ρ_0 is the density of reference and γ represents the polytropic index which may be considered equal to 7 for ocean applications. This means that quite small variations for density will cause a major change in pressure, which is why this approach is called weakly compressible.

According to the work of Monaghan (1994), the compressibility is adjusted in the software so that the speed of sound may be artificially lowered, which will allow the solver to set reasonable values for the size of the time step. Nevertheless, this adjustment forces the sound speed to be at least 10 times faster than the fluid speed (at its maximum value). This is necessary because if we worked with real sound speed, we would need a size of time step very small to assure that the numerical solution could converge, which would significantly increase the running time. Keeping this in mind, we

can define the factor b in equation (7) as:

$$b = \frac{\rho_0 c_0^2}{\gamma} \quad (8)$$

where c_0 is equal to the sound speed when $\rho = \rho_0$.

2.1.4. Viscosity treatment

Viscosity plays a major role in preventing future instabilities in the simulation of the moving fluid. Therefore, viscosity effects should be added to the momentum equation (6).

The easiest way to introduce the viscosity term is the entitled *artificial viscosity* proposed by Monaghan (1992). This is also what we have chosen to follow in the present simulations. According to this, equation (6) is rewritten as:

$$\left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t}\right)_i = - \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{p_j}{\rho_j^2} + \frac{p_i}{\rho_i^2} + \prod_{ij} \right) \nabla_i W_{ij} + \vec{g} \quad (9)$$

where \prod_{ij} represents the term of artificial viscosity. This viscosity treatment has been applied to wave generation and propagation, and interaction with coastal structures in other research papers (e.g., Altomare et al., 2017) providing accurate results when comparing with experimental data.

2.1.5. Boundary conditions

The principal purpose of the boundary conditions is to discretise solid borders and to guarantee that fluid particles interact properly without passing through these walls. Many different approaches can be found in the SPH community, however in this work the boundary is described by a group of particles which are considered different from fluid particles. This approach is named Dynamic Boundary Conditions

(DBC) and full explanation can be found in Crespo et al. (2007).

The DBC approach discretises the region of the domain into boundary particles that satisfy the same equations as fluid particles, however they do not move according to the forces exerted on them. Instead, they remain either fixed in position or move according to a predefined imposed motion. When a fluid particle approaches a boundary at a distance smaller than $2h$, the density of the affected boundary particle increases, resulting in a pressure increase. This results in a repulsive force exerted on the fluid particle due to the pressure term in the momentum equation.

The DBC treatment has demonstrated to work properly when applied to cases of wave propagation and wave run-up of armour block breakwaters (Zhang et al., 2018), where the interaction between fluid and boundary particles becomes critical.

2.2. DualSPHysics package

DualSPHysics solver (Domínguez et al., 2021) is a free and open-source code and it can be downloaded directly from <https://dual.sphysics.org/>. The code is released under the Lesser General Public Licence (LGPL), which means that the software can be incorporated into both free software and proprietary software. The LGPL license aims to encourage other researchers to have an active role in the development of the code.

The first version of the DualSPHysics code was released in 2011 (Crespo et al., 2011), and more than 100.000 downloads have been registered for these 10 years. DualSPHysics can be run on CPUs (Central Processing Units) since it is developed in C++ Language,

but also on GPU cards (Graphic Processing Units) thanks to its parallel programming using CUDA. The fact that the software can be executed on GPU boosted the code's applications, since the GPU executions can be up to 100 times faster than the CPU ones according to Domínguez *et al.* (2013). This allows the software to perform a simulation of cases with millions of particles, when a high resolution is needed, at a reasonable time of simulation.

On the other hand, the software that the users can download freely from the main website not only includes the source code of the solver, but also several tools for pre-processing and post-processing. The pre-processing tools allow the user to define the geometry and the whole configuration of the case. To do this, the user can either create the input XML file or define it through a graphic user interface (based on FreeCad, <https://www.freecadweb.org/>) implemented for DualSPHysics. The post-processing codes are an important part of the software since they allow the user to analyse the results. In this way, forces exerted on objects, surface elevation at different wave gauges, pressure, or velocity fields can be computed.

In addition, files can also be created to visualise images of the simulation using free codes such as ParaView (<https://www.paraview.org/>).

Therefore, the full package includes all the steps, as shown in *Figure 2*. To create a case, run simulate and obtain results with DualSPHysics.

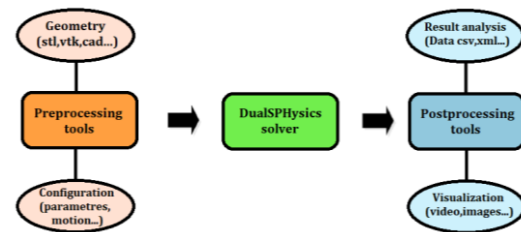


Figure 2: DualSPHysics Package.

2.3. Discretization with particles

Once the case is configured using the XML input file, the pre-processing tool named GenCase can be executed. One of the main purposes of GenCase is to discretize the geometry into fluid or boundary particles.

The resolution in DualSPHysics (so that the number of particles) is given by the initial distance between particles (dp). GenCase uses a 3-D Cartesian lattice (of dp size) to locate particles. The particles are created at the nodes of the 3-D Cartesian mesh: the mesh nodes around the object are defined and then particles are created only in the nodes needed to draw the desired geometry. Note that the geometry of the case is defined independently of the inter-particle distance. This allows the discretization of each test case with a different number of particles simply by varying the resolution dp . This can be observed in *Figure 3*, so that by decreasing dp , you increase the number of particles, so that our case resolution.

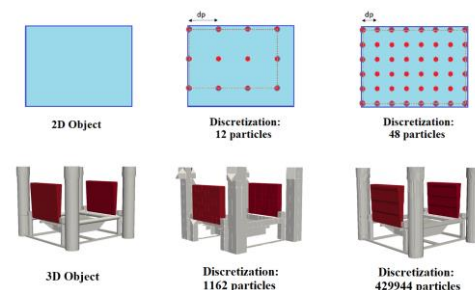


Figure 3. Object discretization using different resolutions.

2.4. Coupling with Project Chrono and with MoorDyn

In the present work, simulations for the FOSWEC device under the action of regular waves were executed, being the software DualSPHysics a good tool to choose. However, the offshore floating device is moored to the seabed and it includes a PTO (Power Take-Off system) that can be numerically simulated through dampers and springs.

The capabilities of the DualSPHysics package can be extended by coupling to other external libraries with more advanced functionalities as it is shown below.

2.4.1. Project Chrono library

As mentioned before, the mechanical restrictions of PTO systems need to be simulated with accuracy. Those systems can be simulated by using functions coupling with the Project Chrono library (Tasora and Anitescu, 2011).

Project Chrono is a free software, which can be freely downloaded directly from the website <https://projectchrono.org/>.

This library has several applications such as robotics, mechatronics, collision detection, off-road vehicle mobility, and multibody dynamics. The latter allows users to run simulations of mechanisms made of rigid bodies. Thus, we can apply mechanical constraints between bodies using a wide set of joints, motors, linear actuators, springs and dampers.

In the case of the FOSWEC, this library allows to simulate the hinges that connect both flaps to the buoyant platform and the experimental properties of the hinges (damping and stiffness coefficients) will be defined in the simulation. Therefore, the forces and torques are numerically solved using a coupling between

DualSPHysics and Project Chrono. More information about the coupling procedure can be found in Canelas *et al.* (2018).

2.4.2. MoorDyn library

In our case of study, the FOSWEC is attached to the bottom by four taut mooring lines, which limit the movement of the WEC (mainly heave). These mooring lines will exert an extra force applied to the device that needs to be simulated accurately.

MoorDyn is an open source-code that can be obtained for free from <http://www.matt-hall.ca/moordyn.html>.

This library can solve the dynamic of the mooring systems and it has been developed in order to be coupled with other software. To compute the mooring tensions, MoorDyn discretizes the lines as punctual masses linked by linear springs, for modelling certain elasticity in the axial direction of the mooring. The model also solves the friction that the moorings have with the bottom of the basin. MoorDyn has proved, with a very simple formulation that is computationally efficient and accurate to simulate floating bodies with moorings under regular waves (Domínguez *et al.*, 2019b).

Figure 4 includes the flow chart of the coupling of DualSPHysics with Project Chrono and with MoorDyn libraries. The main idea is that the interaction between waves and floating rigid bodies is mainly solved using the SPH formulation. However, if collisions or mechanical restrictions (as in the case of the PTO of the FOSWEC) need to be considered, then Project Chrono can compute forces and torques at each time step and solves for the new position of the rigid body considering all forces acting on it (fluid-body forces and mechanical restrictions). In addition, if mooring lines are attached to the

floating body, MoorDyn is used to obtain the forces on the fairleads and DualSPHysics is finally capable to solve the motion of the body.

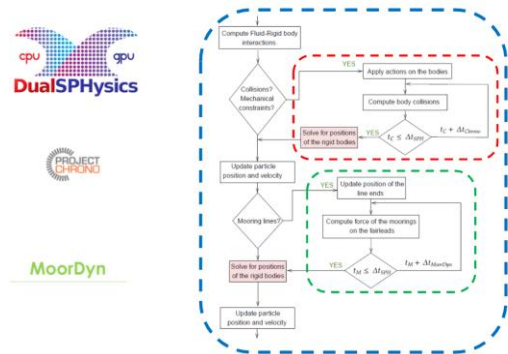


Figure 4. Flow chart of the coupling of DualSPHysics, Project Chrono and MoorDyn.

3. Validation (R5C)

SANDIA National Laboratories has developed the FOSWEC and has analysed its response in their facilities in the United States. The company placed the device in a huge wave pool (*Directional Wave Basin*) where they could create different conditions of regular and irregular waves and set different values of damping and stiffness at the hinge of the flaps.

SANDIA aimed to obtain a large set of values with the least measuring error. They decided to subject the FOSWEC to a certain type of regular waves for a certain amount of time. Once the time to test each kind of wave was over, they modified the movement of the piston so the FOSWEC would be under the action of regular waves of different conditions. These wave conditions are defined in Table 1.

Table 1. Conditions of the regular waves.

		Wave Height [cm]				
		1.5	4.5	13.6	25	40
Wave Frequency [Hz]	0.19	R1A	R1B	R1C	R1D	R1E
	0.26	R2A	R2B	R2C	R2D	R2E
	0.38	R3A	R3B	R3C	R3D	R3E
	0.51	R4A	R4B	R4C	R4D	R4E
	0.64	R5A	R5B	R5C	R5D	R5E
	0.80	R6A	R6B	R6C	R6D	R6E

In this work, the case R5C has been chosen since its simulation takes less runtime than other cases due to its wavelength (to be explained further in this document).

The dimensions of the *Directional Wave Basin* are 48.8 m long and 26.5 m wide, with adjustable depth (defined as 1.36 m for the R5C test). According to Figure 5, the FOSWEC device has been placed in the longitudinal centre line of the pool and almost 17 m away from what it is considered as the origin of the wave basin. In the figure, the FOSWEC is represented as an orange rectangle and the position of several wave gauges (resistive and acoustic) are indicated.

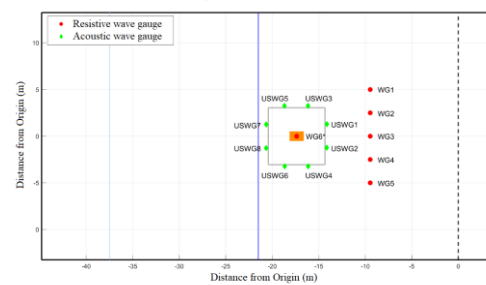


Figure 5. Dimensions of the wave basin and location of the FOSWEC and the wave gauges during the experimental campaign.

3.1. Numerical setup

We need to define a numerical setup that reproduces the same conditions given in the experiment. However, as we used a software such as DualSPHysics, it was not feasible to reproduce exactly the same tank that

SANDIA used in the experimental campaign, since a tank of those dimensions would involve a huge number of SPH particles and enormous computational times. So, instead of an exact reproduction of the wave basin, we configured a smaller numerical tank that can reproduce the same conditions and reduce the runtime.

The test R5C from *Table 1* will be considered so the numerical tank includes the wave parameters set in *Table 2*.

Table 2. Wave conditions of experimental setup R5C.

Parameter	Value
Wave period, T	1.5625 s
Wave height, H	0.136 m
Initial depth, d	1.36 m
Wavelength, L	3.73416 m

To guarantee a proper wave generation and propagation at the FOSWEC position, the device needs to be located at least one wavelength (L) away from the piston. For the target wave condition (R5C case) the wavelength is $L=3.73$ m.

The numerical wave tank is represented in *Figure 6* (lateral and top view). A dissipative beach is also located after the position of the WEC, placed $L/4$ away from the device in order to avoid longitudinal reflection. Regarding the transversal direction (width of the tank), the FOSWEC is placed at mid position and, to avoid lateral reflection, it is necessary to leave some lateral space between the object and the walls of the tank, and to configure a periodicity condition in the lateral walls of the tank.

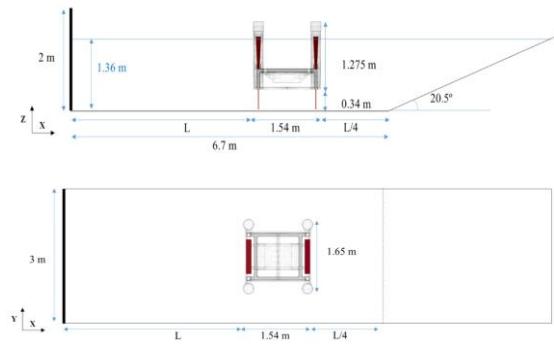


Figure 6. Numerical wave tank for R5C (lateral and top view).

Once the dimensions of the numerical tank are defined, it is very important to consider the actual mass, centre of gravity (COG), and moments of inertia of the hull and the flaps according to the experimental information. The more accurate these values are set, the more accurate the results will be obtained out of the simulation.

The PTO system introduced in the R5C test includes stiffness and damping at the bow and aft flaps following the values of *Table 3*. These coefficients are defined in the configuration of the hinges in the Project Chrono library.

Table 3. Stiffness and damping coefficients of the PTO system.

Parameter	Value
Stiffness coefficient of the bow flap	-3.561 N·m/rad
Damping coefficient of the bow flap	1.762 N·m·s/rad
Stiffness coefficient of the aft flap	2.800 N·m/rad
Damping coefficient of the aft flap	0.465 N·m·s/rad

The simulations are performed for different numerical resolutions. As explained in the section 2.3, a total physical time of 14 seconds is simulated for $dp=0.05, 0.02, 0.01$ m, using a GPU card (GeForce RTX 2080 Ti) as the execution device. *Table 4* includes the number of particles and the runtime for each resolution. It can be observed that

as decreasing dp , the number of particles (Np) increases, so that the runtime does.

Table 4. Resolution, number of particles and runtime.

Dp [m]	Np ($\cdot 10^6$)	Runtime
0.05	0.335	27.6 min
0.02	4.777	7 hours
0.01	36.751	5 days

3.2. Wave propagation and absorption

The wave conditions for the test R5C (Table 2) correspond to Stokes' second order waves, thus they have been generated using DualSPHysics in an automatic way.

Five instants of the simulation with $dp=0.02$ m and without the device in the numerical flume are depicted in Figure 7, where the colouring of the particles corresponds to the longitudinal velocity. The time window showed in the five snapshots covers one complete period ($T=1.5625$ s), so that the first and the last frames are pretty much equal.

Now, the experimental data measured by SANDIA is compared with the results obtained numerically for the three different resolutions (dp).

As it was shown in Figure 5, the experimental resistive wave gauge WG6 was placed at the FOSWEC location. Thus, the validation of the numerical wave propagation is carried out by comparing the SPH results (for the three values of dp) with the experimental data from WG6 gauge, and displayed in Figure 8.

It can be seen that higher resolution leads to better agreement with the experimental time series. In fact, the results with $dp=0.02$ m looks accurate enough.

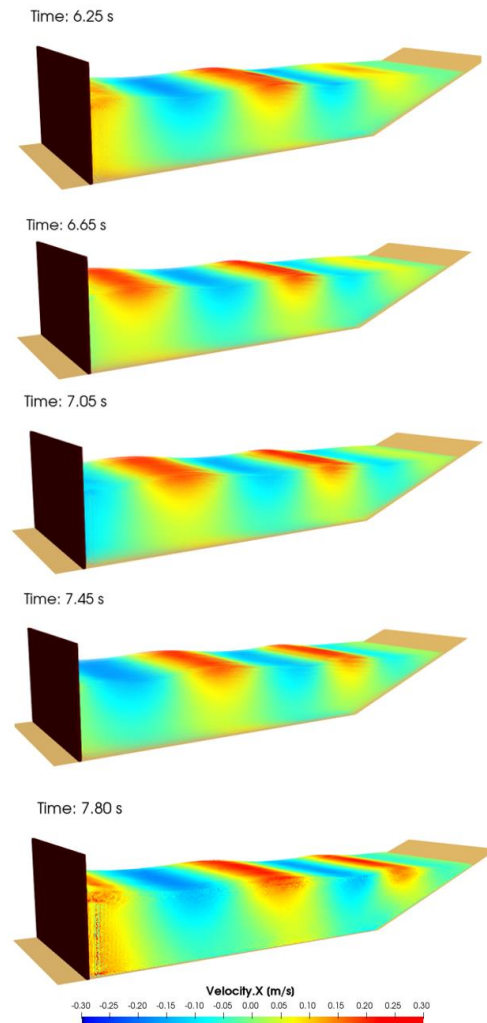


Figure 7. Different instants of the wave propagation during a period ($dp=0.02$ m).

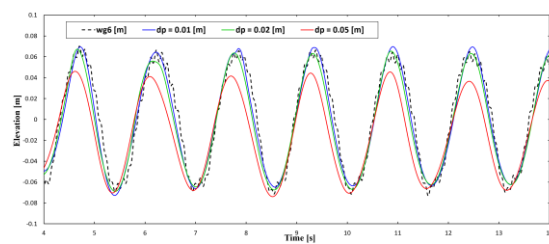


Figure 8. Time series of experimental and numerical free-surface elevation.

3.3. Motions of the hull

The FOSWEC has been introduced in the numerical tank described in previous sections, one wavelength away from the piston. Four instants of the interaction of the device with the regular waves of test R5C are shown in Figure 9. Colour of the particles

corresponds to the values of the longitudinal velocity field.

The following Figure 10 displays the heave, surge and pitch angles of the hull registered during the experiment and computed using DualSPHysics. The simulations were executed for $dp=0.05$ m, 0.02 m and 0.01 m. It can be observed in the figure that there is good concordance between the SPH results and experimental ones, noticing that there is not a big difference between $dp=0.01$ m and $dp=0.02$ m.

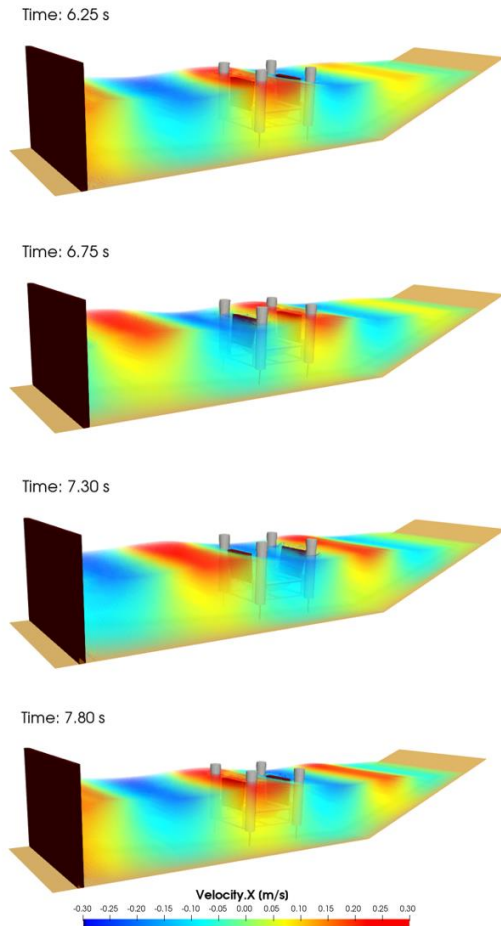


Figure 9. Different instants of the interaction between regular waves and the FOSWEC during a period ($dp=0.02$ m).

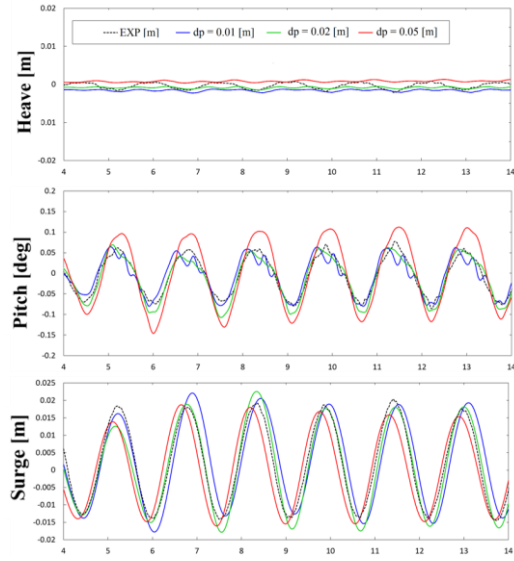


Figure 10. Time series of experimental and numerical heave, surge and pitch ($dp = 0.01$, $dp=0.02$ y $dp = 0.05$)

3.3. Motions of the flaps

Once the motion of the hull is validated, the motion of both flaps need to be evaluated.

The coupling with the Project Chrono library restricts the movement of the flaps, performing the role of a physical hinge. The PTO system is modelled according to Eq. (10) that defines the torque applied along the axis of the hinge:

$$T_{PTO}(t) = -k_{PTO}\theta(t) - b_{PTO}\dot{\theta}(t) \quad (10)$$

where k_{PTO} is the torsional stiffness, b_{PTO} is the torsional damping, θ is the flap angle of rotation and $\dot{\theta}$ is the angular velocity of the flap.

A comparison between the experimental flap angles and the angles during the SPH simulations is displayed in Figure 11. It can be noted that the agreement for the three different resolutions is good enough, which proves the accuracy of the model in simulating the flaps motion.

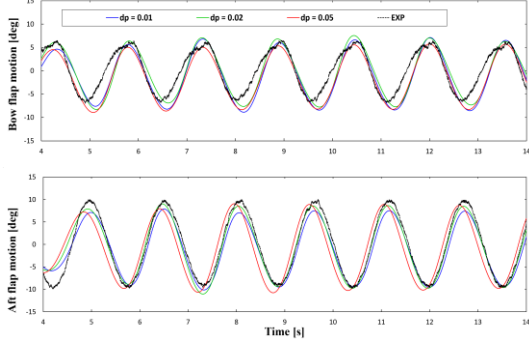


Figure 11. Time series of experimental and numerical angles of bow and aft flaps.

The numerical results showed in the last sections and the good agreement with the experimental data prove the capabilities of the DualSPHysics code (coupled with MoorDyn and Project Chrono) to study the hydrodynamic response of a complex system, such as the FOSWEC device under the action of regular waves.

4. Efficiency analysis.

This chapter will show how the efficiency of the FOSWEC may be computed. In particular, the efficiency for the wave condition analysed in the previous chapter of validation will be obtained. To deepen the knowledge on the studied device, an efficiency analysis is performed for a wide range of wave periods and PTO systems.

4.1. Power computation

The available wave power per meter of width can be computed for the wave front as:

$$J = \frac{1}{16} \rho g H^2 \frac{\omega}{k} \left[1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right] \quad (11)$$

with $\omega=2\pi/T$ defined as the angular velocity and $k=2\pi/L$, the wave number.

The total width of the wave front that interacts with the device is equal to the characteristic width (D), so that the

wave power, P_w , that can be absorbed by the device will be:

$$P_w = JD \quad (12)$$

The energy harvested by the device is taken from the motion of the flaps and defined as the dissipated viscous force, so that the power absorbed by this PTO system is determined by:

$$P_a(t) = b_{PTO} \dot{\theta}(t) \cdot \frac{d\theta(t)}{dt} = b_{PTO} \dot{\theta}^2(t) \quad (13)$$

The integral of Eq. (13) over one time period (T) gives us the averaged power absorbed by the device:

$$P_a = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} P_a(t) dt \quad (14)$$

Therefore, we define here below the efficiency using the Capture Width Ratio (CWR) parameter that can be obtained as:

$$CWR = \frac{P_{a,bow} + P_{a,aft}}{P_w} \quad (15)$$

4.2. Results for the validation case

We start computing the efficiency achieved by the FOSWEC device in the physical test R5C, which is the test chosen to conduct the validation presented in Section 3.

To determine the absorbed power, the magnitude of interest is the angular velocity of the two flaps (bow and aft), which is represented in *Figure 12*. The time series of the simulations with different resolutions ($dp=0.05, 0.02$ and 0.01 m) are included in the figure and it can be observed that the values of the two highest resolutions converged to the same result.

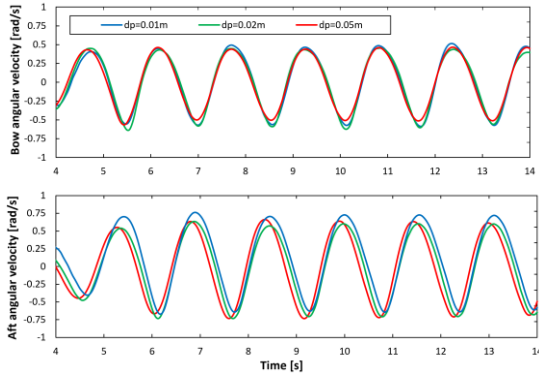


Figure 12: Time series of the angular velocity of the flaps for different resolutions.

Considering that the flap width of the FOSWEC is $D=0.76$ m, and using the angular velocity obtained in the simulations with $dp=0.02$ m, we can compute P_w , $P_{a,bow}$, $P_{a,aft}$ and CWR according to the expressions described in previous section 4.1.

The results for the R5C case are shown in Table 5, here below:

Table 5. Power and efficiency results of R5C.

Parameter	Value
P_w	22.537 W
$P_{a,bow}$	4.676 W
$P_{a,aft}$	2.003 W
CWR	29.64 %

4.3. Further numerical study

DualSPHysics is now used to conduct an efficiency study where we have considered different wave conditions and PTO systems:

- i) six different wave periods have been set but using same wave height and initial water depth as in the R5C case (Table 6)
- ii) different PTO configurations using three different damping coefficients (Table 7).

Table 6. Different wave conditions used in the efficiency study.

H [m]	d [m]	T [s]	L [m]
0.136	1.360	1.000	1.560
0.136	1.360	1.125	1.975
0.136	1.360	1.250	2.440
0.136	1.360	1.375	2.934
0.136	1.360	1.563	3.740
0.136	1.360	1.786	4.720

Table 7. Different PTO configurations used in the efficiency study.

	PTO 1	PTO 2	PTO 3
Stiffness [Nm/rad]	0	0	0
Damping (bow) [Nms/rad]	1.762	2.643	3.524
Damping (aft) [Nms/rad]	0.4654	0.6981	0.9308

A total of 18 simulations were executed using a resolution of $dp=0.02$ m to provide a good balance between accuracy and runtimes during the validation stage.

The wave power and absorbed power by the FOSWEC are represented in Figure 13 for different wave periods and using three sets of damping coefficients in the PTO system. It can be observed that wave power increases with the wave period while the absorbed power by the device is maximum for wave periods of 1.563 s.

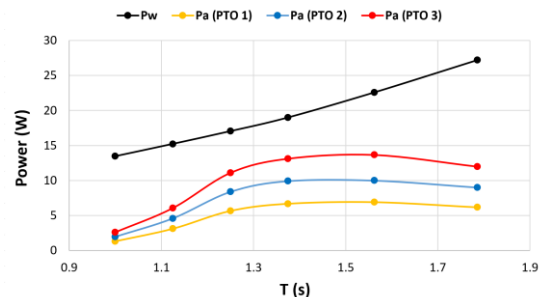


Figure 13. Wave power and power absorbed by the FOSWEC for different wave periods.

Figure 14 shows the CWR according to eq. (15). The efficiency increases with the damping coefficients (Table 7).

Regarding the wave period, the maximum efficiency is reached for $T=1.375$ s.

Analysing the 18 simulations, the maximum efficiency was achieved for the higher damping coefficients in both flaps and for the intermediate wave periods, reaching 70% of maximum efficiency.

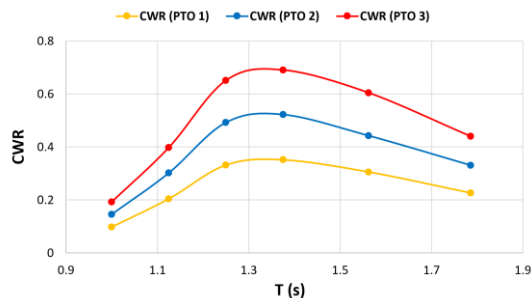


Figure 14. Efficiency of the FOSWEC as function of wave period and for different PTO systems.

5. Conclusions and future work.

This work has shown that the SPH method is a feasible alternative to traditional mesh-based methods when the purpose is to simulate a floating device, like the FOSWEC, under the action of regular waves.

Particularly, it has been proven that the free software DualSPHysics is able to generate, propagate, and absorb waves, and to reproduce the interaction between the FOSWEC and these waves, through performing the validation of the experimental case R5C conducted by SANDIA.

Once the numerical tool was validated, DualSPHysics was used to analyse the efficiency of different cases including different wave conditions (different wave periods) and different PTO configurations (different damping values of the PTO). A total number of 18 different tests were executed. The maximum efficiency for these cases

(70%) was achieved for $T=1.375$ s and damping coefficients of 3.524 and 0.9308 Nms/rad in the bow and aft flaps, respectively. However, in order to find out if a higher efficiency may be reached, a more complete efficiency study needs to be performed in future considering much higher PTO damping values than the ones used for this project and other wave conditions.

This efficiency study evidences that DualSPHysics is a very useful tool to help in the design stages of wave energy converters.

Throughout this study, only regular waves have been simulated; however, it is also possible to reproduce irregular or focused waves, in order to reproduce more realistic ocean and sea conditions.

Simulations with irregular wave conditions are aimed to be executed for following studies. In particular, it is of special interest, the possibility to run cases under extreme wave conditions, in order to study the survivability of the device, which will help to determine the viability of the FOSWEC to become a real alternative way to obtain energy with zero CO₂ emissions.

Acknowledgements

This work was partially financed by Xunta de Galicia, Consellería de Cultura, Educación e Universidade, under project ED431C 2021/44 "Programa de Consolidación e Estructuración de Unidades de Investigación Competitivas".

References

Altomare, C, Domínguez, JM, Crespo, AJC, Gonzalez-Cao, J, Suzuki, T, Gómez-Gesteira, M, Troch, P, 2017. Long-crested wave generation and

- absorption for SPH-based DualSPHysics model. *Coastal Engineering* 127, 37–54.
- Altomare, C, Tagliaferro, B, Domínguez, JM, Suzuki, T, Viccione, G, 2018. Improved relaxation zone method in SPH-based model for coastal engineering applications. *Applied Ocean Research* 81, 15–33.
- Batchelor, GK. 1974. *Introduction to fluid dynamics*. Cambridge University Press.
- Brito, M, Canelas, RB, García-Feal, O, Domínguez, JM, Crespo, AJC, Ferreira, RML, Neves, MG, Teixeira, L, 2020. A numerical tool for modelling oscillating wave surge converter with nonlinear mechanical constraints. *Renewable Energy* 146, 2024–2043.
- Canelas, RB, Brito, M, Feal, OG, Domínguez, JM, Crespo, AJC, 2018. Extending DualSPHysics with a Differential Variational Inequality: modeling fluid-mechanism interaction. *Applied Ocean Research* 76, 88–97.
- Coe, RG, Bacelli, G, Forbush, D, Spencer, SJ, Dullea, K, Bosma, B, Lomonaco, P, 2020. FOSWEC dynamics and controls test report. United States.
- Crespo, A, Gómez-Gesteira, M, Dalrymple, RA, 2007. Boundary conditions generated by dynamic particles in SPH methods.
- Crespo, AJC, Domínguez, JM, Barreiro, A, Gómez-Gesteira M, Rogers, BD, 2011. GPUs, a new tool of acceleration in CFD: Efficiency and reliability on Smoothed Particle Hydrodynamics methods. *PLoS ONE*, 6(6), e20685.
- Crespo, A, Altomare, C, Domínguez, JM, González-Cao, J, Gómez-Gesteira, M, 2017. Towards simulating floating offshore oscillating water column converters with Smoothed Particle Hydrodynamics. *Coastal Engineering*, 126, 11-26.
- Domínguez, JM, Crespo, A, Gómez-Gesteira, M, 2013. Optimization strategies for CPU and GPU implementations of a smoothed particle hydrodynamics method. *Computer Physics Communications* 184(3), 617-627.
- Domínguez, J, Altomare, C, Gonzalez-Cao, J, Lomonaco, P, 2019a. Towards a more complete tool for coastal engineering: solitary wave generation, propagation and breaking in an SPH-based model. *Coastal Engineering Journal* 61 (1), 15–40.
- Domínguez, JM, Crespo, AJC, Hall, M, Altomare, C, Wu, M, Stratigaki, V, Troch, P, Cappiotti, L, Gomez-Gesteira, M, 2019b. SPH simulation of floating structures with moorings. *Coastal Engineering* 153, 103560.
- Domínguez, JM, Fourtakas, G, Altomare, C, Canelas, RB, Tafuni, A, García-Feal, O, Martínez-Estévez, I, Mokos, A, Vacondio, R, Crespo, AJC, Rogers, BD, Stansby, PK, Gomez-Gesteira, M, 2021. DualSPHysics: from fluid dynamics to multiphysics problems. *Computational Particle Mechanics*.
- Falnes, J, 2007. A review of wave-energy extraction. *Marine structures*, 20, 185-201.
- González-Cao, J, Altomare, C, Crespo, AJC, Domínguez, JM, Gómez-Gesteira, M, Kisacik, D, 2018. On the accuracy of DualSPHysics to assess violent collisions with coastal structures. *Computers & Fluids*, 179, 604-612.
- Gotoh, H, Khayyer, A, 2018. On the state-of-the-art of particle methods for coastal and ocean engineering. *Coastal Engineering Journal*, 60. 1-25.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2011-2020.

- IDEA (2011-2020) Plan de Energías Renovables, 191 - 226.
- Luo, M, Abbas, K, Pengzhi, L, 2021. Particle methods in ocean and coastal engineering. *Applied Ocean Research*, 114, 102734.
- Manenti, S, Wang, D, Domínguez, JM, Li, S, Amicarelli, A, Albano, R, 2019. SPH Modeling of Water-Related Natural Hazards. *Water*, 11(9), 1875.
- Monaghan, J, 1992. Smoothed particle hydrodynamics. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 30, 543- 574.
- Monaghan, J, 1994. Simulating free surface flows with sph. *Journal of Computational Physics*, 110, 399-4.
- Monaghan J, Kos, A. 1999. Solitary waves on a Cretan beach. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 125, 145-154.
- Quartier, N, Crespo, A, Domínguez, JM, Stratigaki, V, Troch, P, 2021. Efficient response on an onshore Oscillating Water Column Wave Energy Converter using a one-phase SPH model coupled with a multiphysics library. *Applied Ocean Research*, 115, 102856.
- Ropero-Giralda, P, Crespo, A, Tagliafierro, B, Altomare, C, Domínguez, JM, Gómez-Gesteira, M, Vincione, G, 2020. Efficiency and survivability análisis of a point - absorber wave energy converter using DualSPHysics. *Renewable Energy*, 162, 1763-1776.
- Ropero-Giralda, P, Crespo, AJC, Coe, RG, Tagliafierro, B, Domínguez JM, Bacelli, G, Gómez-Gesteira, M, 2021. Modelling a heaving point-absorber with a closed-loop control system using the DualSPHysics code. *Energies* 14(3), 760.
- Shadloo, MS, Oger, G, Le Touzé, D, 2016. Smoothed particle hydrodynamics method for fluid flows, towards industrial applications: Motivations, current state, and challenges. *Computers & Fluids* 136, 11-34.
- Tasora, A, Anitescu, M, 2011. A matrix-free cone complementarity approach for solving large-scale, nonsmooth, rigid body dynamics. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 200, 439-453.
- Verbrugge, T, Stratigaki, V, Altomare, C, Domínguez, JM, Troch, P, Kortenhaus, A, 2019. Implementation of Open Boundaries within a Two-Way Coupled SPH Model to Simulate Nonlinear Wave-Structure Interactions. *Energies*, 12(4), 697.
- Violeau, D, Rogers, BD, 2016. Smoothed particle hydrodynamics (SPH) for free-surface flows: past, present and future. *Journal of Hydraulic Research* 54 (1), 1-26.
- Zhang F., Crespo A.J.C., Altomare C., Domínguez J.M., Marzeddu A., Shang S., Gómez-Gesteira M. 2018. DualSPHysics: a numerical tool to simulate real breakwaters. *Journal of Hydrodynamics*, 30(1), 99-105.