

Trabajo de Fin de Máster

**Caracterización del Recurso  
Energético Undimotriz en el Golfo  
de Vizcaya en un contexto de  
Cambio Climático**

*Brieuc Thomas*

Tutores

*Xurxo Costoya Noguerol*

*María Teresa de Castro Rodríguez*

Curso 2021/2022

# Índice

<b>Agradecimientos</b> .....	<b>3</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>4</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>5</b>
<b>Resumo</b> .....	<b>6</b>
<b>Lista de figuras y tablas</b> .....	<b>7</b>
<b>Lista de acrónimos</b> .....	<b>9</b>
<b>1. Introducción</b> .....	<b>10</b>
1.1. El cambio climático .....	10
1.2. Las energías marinas renovables.....	11
1.3. La energía undimotriz .....	11
1.4. Estado del arte .....	12
1.5. Objetivos .....	14
<b>2. Datos y métodos</b> .....	<b>15</b>
2.1. Datos .....	15
2.2. Métodos.....	16
2.2.1. Potencia del oleaje .....	16
2.2.2. Clasificación del recurso undimotriz .....	17
2.2.3. Índices para analizar los WECs .....	19
<b>3. Resultados</b> .....	<b>23</b>
3.1. Caracterización del recurso undimotriz .....	23
3.1.1. Variación del recurso anual .....	23
3.1.2. Variación del recurso estacional .....	25
3.2. Clasificación del recurso undimotriz .....	27
3.3. Potencia generada por los WECs .....	30
3.3.1. Costa española del Golfo de Vizcaya .....	30
3.3.2. Costa francesa del Golfo de Vizcaya.....	31
<b>4. Discusión</b> .....	<b>33</b>
<b>5. Conclusiones</b> .....	<b>36</b>
<b>Bibliografía</b> .....	<b>38</b>

## **Agradecimientos**

En primer lugar, agradezco a mis tutores Xurxo y Maite. Gracias por proponerme este trabajo, por vuestra ayuda a lo largo de la realización de este TFM y vuestra disponibilidad inequívoca.

También quiero agradecer a mis compañeras y compañeros de clase que, a lo largo del año, me han ayudado cuando lo necesitaba y han aguantado mi pronunciación caótica del castellano.

Y agradezco también al profesorado del Máster en Oceanografía de la UVigo por su dedicación y lo que nos han enseñado.

## Abstract

Marine renewable energies are a key asset to fight global warming. Although wave energy is not yet commercially exploited, the characterization of wave energy is of special interest with a view to exploiting it in the coming years. It is necessary to take into account different parameters beyond the richness of the resource when determining where to install Wave Energy Converters (WECs). Thus, more aspects must be examined, such as the variability of the resource, the environmental risk, and the economic cost of installing and maintaining these WECs. Following the work of [Ribeiro et al. \(2021\)](#), seven indices have been defined to classify the wave resource and a Delphi approach has been applied. These indices consider the mean wave energy resource, the resource stability (temporal and monthly variability), the operability (Downtime index: percentage of time the WEC does not operate due to waves too small or too high), the environmental risk (extreme waves) and the economic costs of installation and maintenance (water depth and distance from the coast). Each index has been given a weight and they have been averaged to obtain a single index that allows the wave resource to be easily classified. In addition, this TFM has studied the electrical power that two WECs (AquaBuoy and Pelamis) could generate near the French and Spanish coasts in the Bay of Biscay. The data used for these analyses, both historical and future, come from a downscaling carried out with the SWAN (Simulating Waves Nearshore) model. This model was forced with wind data from a regional climate model and, at open ocean boundaries, with coarse-resolution ocean data from WAVEWATCH III simulations.

Regarding the results obtained, a decrease in the average wave power in the Bay of Biscay is expected throughout the 21<sup>st</sup> century, being more pronounced towards the end of the century. This decrease will be less in winter than in other seasons, which will increase the variability of the resource. Despite the future wave power decrease, the classification of the wave resource in the Bay of Biscay shows that the resource is considered “excellent” in most of the region and as “outstanding” at certain areas for the near future (2026-2045). When analyzing the power generated by the AquaBuoy and Pelamis WECs, it was found that Pelamis produces more power but its load factor and efficiency, which is a parameter that considers the size of the device, are lower when compared to the AquaBuoy both on the Spanish and French coasts.

## Resumen

Las energías marinas renovables son una herramienta clave para luchar contra el cambio climático. Aunque la energía de las olas todavía no se explota comercialmente, la caracterización de esta energía undimotriz es de especial interés de cara a explotarla en los próximos años. A la hora de decidir donde instalar *Wave Energy Converters* (WECs), es necesario tener en cuenta diferentes parámetros más allá de la riqueza del recurso. Así, se deben examinar aspectos como la variabilidad del recurso, el riesgo ambiental, y el coste económico de instalación y mantenimiento de estos WECs. Siguiendo el trabajo de [Ribeiro et al. \(2021\)](#), se ha realizado un método Delphi a 7 índices definidos para clasificar el recurso undimotriz. Estos índices consideran la potencia undimotriz media, la estabilidad del recurso (variabilidad temporal y mensual), la operatividad (índice *Downtime*: porcentaje de tiempo durante el cual el aparato no funciona debido a olas demasiado grande o pequeñas), el riesgo ambiental (olas extremas) y el coste económico de instalación y mantenimiento (profundidad del agua y distancia a costa). A cada índice se le ha otorgado un peso y se ha realizado el promedio para obtener un único índice que permite clasificar fácilmente el recurso del oleaje. Además, en este TFM se ha estudiado la potencia eléctrica que dos WECs (AquaBuoy y Pelamis) podrían generar cerca de las costas francesas y españolas del Golfo de Vizcaya. Los datos utilizados para estos análisis, tanto históricos como futuros, provienen de un *downscaling* hecho con el modelo SWAN (*Simulating Waves Nearshore*). Este modelo se alimentó con datos de viento de un modelo climático regional y, en las fronteras abiertas oceánicas, con los datos oceánicos de gruesa resolución obtenidos de las simulaciones realizadas con el modelo WAVEWATCH III.

En cuanto a los resultados obtenidos, se espera un descenso de la potencia undimotriz media en el Golfo de Vizcaya a lo largo del siglo XXI, siendo más acusado hacia finales de siglo. Este descenso será menor en invierno que en otras estaciones, lo que aumentará la variabilidad del recurso. A pesar de este descenso de la potencia undimotriz en el futuro, la clasificación del recurso undimotriz en el Golfo de Vizcaya muestra que el recurso se considerará “excelente” en la mayor parte de la región y como “sobresaliente” en ciertas zonas durante el futuro cercano (2026-2045). A la hora de analizar la potencia generada por los WECs AquaBuoy y Pelamis, se ha visto que Pelamis produce mayor cantidad de potencia pero que su factor de carga y su eficiencia, que es un parámetro que considera el tamaño del dispositivo, son menores que el de AquaBuoy tanto en la costa española como francesa.

## Resumo

As enerxías mariñas renovables son unha ferramenta clave para loitar contra o cambio climático. Aínda que polo de agora a enerxía undimotriz non se explota comercialmente, a caracterización da enerxía das ondas é de especial interese para explotala nos próximos anos. Á hora de decidir onde instalar un convertidor de enerxía das ondas (*Wave Energy Converter*, WEC), é necesario ter en conta diferentes parámetros máis aló da riqueza do recurso. Así, débense examinar aspectos como a variabilidade do recurso, o risco ambiental, e o custo económico de instalación e mantemento destes WECs. Seguindo o traballo de [Ribeiro et al. \(2021\)](#), aplicouse un Delphi a 7 índices que se definiron para clasificar o recurso undimotriz. Estes índices consideran a potencia undimotriz media, a estabilidade do recurso (variabilidade temporal e mensual), a operatividade (índice *Downtime*: porcentaxe de tempo durante o cal o aparello non funciona debido a ondas demasiado grandes ou pequenas), o risco ambiental (ondas extremas) e o custo económico de instalación e mantemento (profundidade da auga e distancia a costa). A cada índice outorgóuselle un peso e fíxose o promedio para obter un único índice que permite clasificar facilmente o recurso da ondada. Ademais, neste TFM estudouse a potencia eléctrica que dous WECs (AquaBuoy e Pelamis) poderían xerar preto das costas francesas e españolas do Golfo de Biscaia. Os datos utilizados para estas análises, tanto históricos como futuros, proveñen dun *downscaling* feito co modelo SWAN (*Simulating Waves Nearshore*). Este modelo alimentouse con datos de vento dun modelo climático rexional e, nas fronteiras abertas oceánicas, cos datos oceánicos de grosa resolución obtidos das simulacións realizadas co modelo WAVEWATCH III.

En canto aos resultados obtidos, espérase un descenso da potencia undimotriz media no Golfo de Biscaia ao longo do século XXI, sendo máis acusado cara a finais de século. Este descenso será menor no inverno que noutras estacións, o que aumentará a variabilidade do recurso. A pesar deste descenso da potencia undimotriz futura, a clasificación do recurso undimotriz no Golfo de Biscaia mostra que o recurso se considerará “excelente” na maior parte da rexión e como “sobresaliente” en certas zonas durante o futuro próximo (2026-2045). Á hora de analizar a potencia xerada polos WECs AquaBuoy e Pelamis, vese que o Pelamis produce maior cantidade de potencia pero que o seu factor de carga e a súa eficiencia, que é un parámetro que considera o tamaño do dispositivo, son menores cos do AquaBuoy tanto na costa española como francesa.

## Lista de figuras y tablas

**Figura 1.** Modelización bajo el escenario RCP8.5 de (a) la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> (b) el cambio de temperatura del planeta (IPCC, 2021).

**Figura 2.** WECs de tipo (A) Atenuador (B) Absorbedor puntual (C) Terminador. Fuente: (A)(B) aquaret.com ; (C) atargis.com

**Figura 3.** Zona de estudio señalada con un rectángulo rojo. Fuente: Google Earth

**Figura 4.** Batimetría de la zona de estudio y dominios empleados en las simulaciones con SWAN.

**Figura 5.** H<sub>s</sub>, T<sub>p</sub> y WP anuales para el periodo histórico (1979-2005).

**Figura 6.** Variación del potencial del oleaje ( $\Delta$ WP) anual de los futuros (A) cercano (B) lejano.

**Figura 7.** WP estacionales para el periodo histórico (1979-2005).

**Figura 8.**  $\Delta$ WP estacionales para el futuro cercano (2026-2045).

**Figura 9.**  $\Delta$ WP estacionales para el futuro lejano (2081-2099).

**Figura 10.** Índices WP y DWNT normalizados para el futuro cercano (2026-2045).

**Figura 11.** Índices C<sub>v</sub> y M<sub>v</sub> normalizados para el futuro cercano (2026-2045).

**Figura 12.** Índice Risk normalizado para el futuro cercano (2026-2045).

**Figura 13.** Índices WD y DC normalizados para el futuro cercano (2026-2045).

**Figura 14.** Índice final y su clasificación para el futuro cercano (2026-2045).

**Figura 15.** P<sub>E</sub>,  $\epsilon$  y Eficiencia del AquaBuoy (columna izquierda) y el Pelamis (columna derecha) en la costa española en el futuro cercano (2026-2045).

**Figura 16.** P<sub>E</sub>,  $\epsilon$  y Eficiencia del AquaBuoy (arriba) y el Pelamis (abajo) en la costa francesa en el futuro cercano (2026-2045).

**Tabla 1.** Criterios de normalización de los índices WP,  $C_v$ ,  $M_v$ , DWNT y Risk.

**Tabla 2.** Criterios de normalización de los índices WD y DC.

**Tabla 3.** Peso de cada índice normalizado.

**Tabla 4.** Clasificación del potencial undimotriz

**Tabla 5.** Características de los WECs AquaBuoy y Pelamis.

**Tabla 6.** Matriz de potencia (en kW) del WEC AquaBuoy.

**Tabla 7.** Matriz de potencia (en kW) del WEC Pelamis.

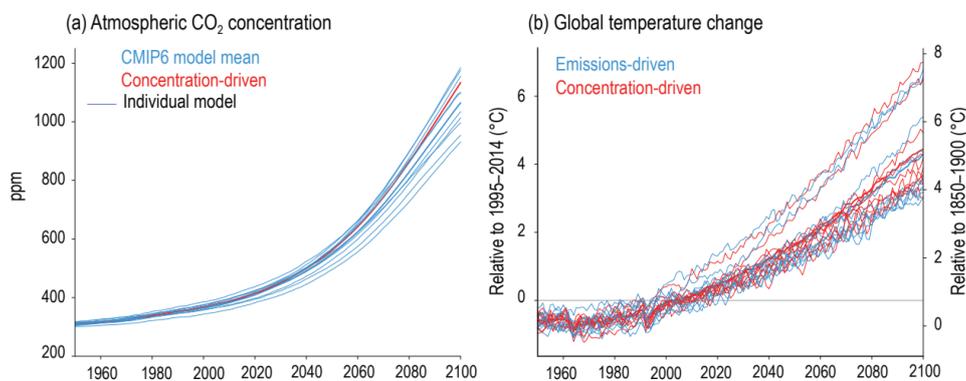
## Lista de acrónimos

<b>Acrónimo</b>	<b>Significado</b>
TFM	Trabajo de Fin de Máster
WEC	Wave Energy Converter
GEI	Gas de Efecto Invernadero
EMR	Energías Marinas Renovables
RCP	Representative Concentration Pathway
GCM	Global Climate Model
RCM	Regional Climate Model
WWIII	WAVEWATCH III
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation
CFSR	Climate Forecast System Reanalysis
MIROC5	Model for Interdisciplinary Research on Climate
EURO-CORDEX	European branch of Coordinated Regional Downscaling Experiment
SWAN	Simulating Waves Nearshore
$H_s$	Wave Significant Height
$T_p$	Wave Peak Period
WP	Wave Power
WD	Water Depth
DC	Distance from Coast
DWNT	Downtime

# 1. Introducción

## 1.1. El cambio climático

Durante los últimos siglos, el crecimiento de la población humana y el uso de los combustibles fósiles como fuente de energía han generado un aumento significativo en las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (GEI), entre ellos del CO<sub>2</sub>. Esta subida de la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> ha provocado un aumento de la temperatura global del planeta (ver **Figura 1**) y ha alterado su clima, provocando más catástrofes naturales y deteriorando las condiciones de vida de mucha gente (IPCC, 2021).



**Figura 1.** Modelización bajo el escenario RCP8.5 de (a) la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> (b) el cambio de temperatura del planeta (IPCC, 2021).

Por lo tanto, es fundamental reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> para mitigar los efectos negativos del cambio climático. En la COP26 de Glasgow en 2021, las Naciones Unidas reafirmaron el objetivo de limitar el incremento de la temperatura media mundial a +2°C frente al nivel preindustrial. Para ello, estiman que hace falta alcanzar emisiones netas de CO<sub>2</sub> nulas a mediados del siglo XXI (United Nations, 2021).

Para predecir el clima futuro, en el quinto informe del IPCC (2014) se definieron escenarios climáticos llamados *Representative Concentration Pathways* (RCPs). Son escenarios que modelizan cómo va a variar la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera y así predicen el forzamiento radiativo (diferencia entre la energía solar absorbida por la Tierra y la energía emitida por la Tierra que llega hasta fuera de la atmósfera) del planeta en 2100. Se definieron cuatro RCPs: el más optimista es el RCP2.6 que predice una bajada de la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> a partir de 2020 y cero emisiones en 2100. El número 2.6 representa el forzamiento radiativo que será de 2.6 W.m<sup>-2</sup> a finales del siglo XXI (hoy en día, su valor es ~ 3 W.m<sup>-2</sup>). El más pesimista es el escenario RCP8.5, que predice que las emisiones

de GEI van a seguir subiendo a lo largo del siglo hasta superar concentraciones de CO<sub>2</sub> de 900 partes por millón, lo que se traduce en un forzamiento radiativo de 8.5 W.m<sup>2</sup> a finales de siglo. En el medio se encuentran el RCP4.5 y RCP6.0. Así, los modelos del clima futuro de la Tierra varían según el RCP usado. En el trabajo desarrollado por [Hennemuth et al. \(2017\)](#) se puede consultar información detallada sobre cada RCP.

## **1.2. Las energías marinas renovables**

Una manera de avanzar en el cumplimiento de los objetivos internacionales de reducción de gases de efecto invernadero es desarrollar nuevas fuentes de energía “limpias”. Teniendo en cuenta que los océanos representan aproximadamente el 71% de la superficie de la Tierra, el estudio de energías marinas renovables (EMR) tiene un gran potencial. La Unión Europea (UE) estima que aproximadamente unos 100 GW, que equivale al 10% del consumo de electricidad en la UE, puede ser generado por energías marinas renovables en 2050 ([ETIPOCEAN, 2020](#)). La única EMR madura, que ya se usa de manera comercial, es la energía eólica offshore, es decir turbinas eólicas instaladas en el mar. Los primeros experimentos europeos empezaron durante los años 90 en Dinamarca ([EESI, 2010](#)) y desde 2019 se ha alcanzado el número de 5000 turbinas *offshore* en funcionamiento, con una potencia total mayor de 22 GW ([WindEurope, 2019](#)).

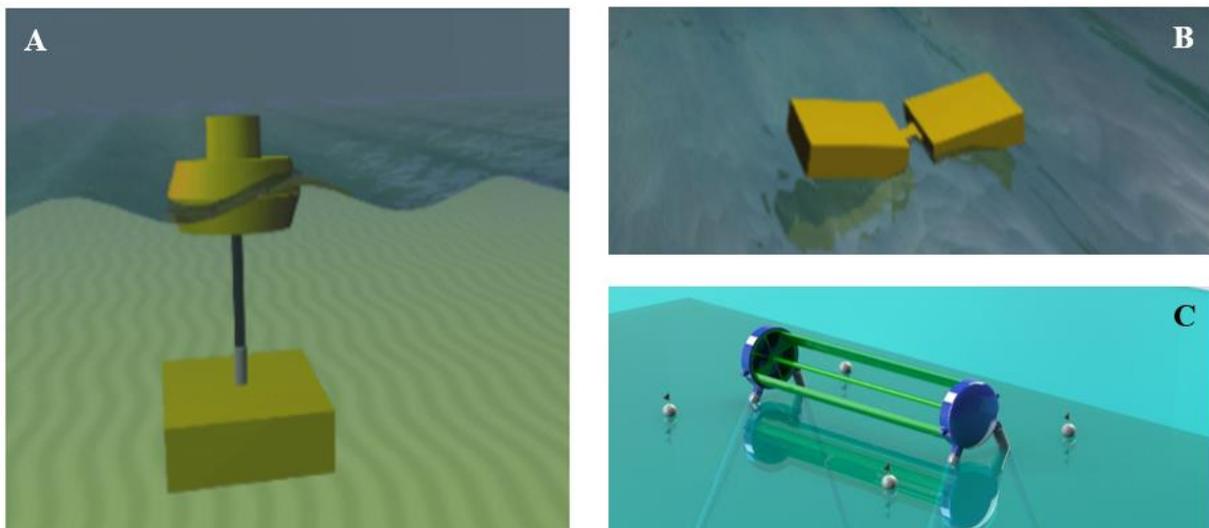
Aparte de la energía eólica marina, existen otras EMR, todavía en fases de análisis y estudio, que podrían ayudar a luchar contra el cambio climático dentro de las próximas décadas. Así, por ejemplo, se está estudiando el aprovechamiento energético de las corrientes marinas (debidas a mareas, por ejemplo) o de gradientes de salinidad y temperatura ([Zabihian et al., 2011](#)). La EMR que se va a analizar en este TFM es la energía undimotriz, que obtiene energía a partir del movimiento del oleaje.

## **1.3. La energía undimotriz**

La energía undimotriz todavía no se explota comercialmente, pero existen muchos proyectos que tratan de desarrollar dispositivos que permitan su aprovechamiento ([IRENA, 2021](#)). En teoría, la energía llevada por todas las olas de todos los océanos es de casi 30,000 TWh por año, lo que sería suficiente para cubrir la demanda energética mundial ([Mørk et al., 2010](#)). Sin embargo, la potencia teórica que existe es muy diferente de la que realmente se puede recoger,

porque hay que usar WECs que, como cualquier sistema mecánico, tienen pérdidas energéticas y solo recogen una fracción de toda la energía que lleva el oleaje.

Existen muchos WECs con geometrías y características diferentes (Hayward, 2011). Aunque existen diferentes clasificaciones para los WECs, lo más habitual es clasificarlos de acuerdo a su geometría y su posición frente al tren de olas. Así, los WECs de tipo “Absorbedor puntual” (Figura 2A) son estructuras bastante pequeñas, como boyas flotantes que recogen energía al moverse de manera vertical gracias al oleaje. Los WECs de tipo “Atenuador” (Figura 2B): son estructuras flotantes muy largas que se instalan paralelas al sentido de propagación del oleaje (es decir, perpendicular a las olas) y recogen energía al moverse con el paso de la ola. Finalmente, los WECs de tipo “Terminador” (Figura 2C), son también estructuras flotantes largas, pero que se instalan perpendicular al sentido de propagación de las olas y captan directamente su energía. Cada tipo de aparato es más adecuado a ciertos tipos de oleaje y de profundidad.



*Figura 2. WECs de tipo (A) Atenuador (B) Absorbedor puntual (C) Terminador.*

*Fuente: (A)(B) [aquaret.com](http://aquaret.com) ; (C) [atargis.com](http://atargis.com)*

## 1.4. Estado del arte

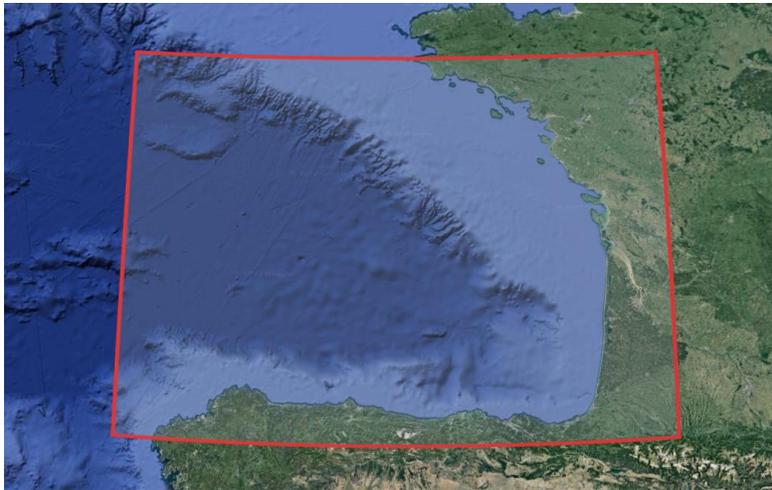
Estudios previos ya analizaron las variaciones que se esperan en el recurso undimotriz en las próximas décadas como consecuencia del impacto del cambio climático. Son múltiples los estudios que se han realizado a escala regional. Ribeiro et al. (2021) estudiaron el recurso undimotriz futuro bajo el escenario climático RCP8.5 en el noroeste de la Península Ibérica. Estos autores predicen una bajada general de la potencia undimotriz, así como un aumento de

la variabilidad estacional y de los eventos extremos. Los datos fueron obtenidos usando el modelo SWAN. Este modelo también ha permitido estudiar el recurso undimotriz futuro en otras zonas, por ejemplo en el mar Negro para el periodo 2021-2050 bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 (Rusu, 2019). Este estudio proyecta un incremento del recurso undimotriz (mayor bajo el escenario RCP8.5) en el oeste y en la región noreste del Mar Negro. SWAN se utilizó también para estudiar la zona de Menorca para el periodo 2071-2100 (Sierra et al., 2017). Este estudio predice una bajada ligera de la potencia undimotriz, tanto a escala anual como estacional, salvo en verano. Por lo tanto, la estabilidad del recurso a lo largo del año mejorará. Lira-Loarca et al. (2021) analizaron la variación del potencial undimotriz en el Mediterráneo utilizando un multimodelo del proyecto CORDEX. Detectaron una disminución en la mayor parte de la cuenca mediterránea, especialmente hacia finales del siglo XXI donde se proyectan disminuciones generalizadas en torno al 10-20% comparada al periodo histórico. También en el Mar Mediterráneo, (Casas-Prat et al., 2013), proyecta en la zona noroeste un aumento de la variabilidad del recurso, es decir, un incremento de la energía undimotriz en invierno y una bajada en verano. Usando el modelo WAVEWATCH III (WWIII), se ha analizado el recurso undimotriz en Cornualles para el periodo 2061-2100 en el trabajo de Reeve et al. (2011). Se espera una bajada entre 1 y 3 % de la potencia undimotriz, dependiendo del escenario climático usado. Para estos 3 últimos estudios se consideró el impacto de los GEI bajo los escenarios A1B y B1 del cuarto informe del IPCC (2007), que corresponden respectivamente a emisiones intermedias y bajas.

Otros trabajos estudiaron el impacto del cambio global sobre la potencia undimotriz a escala mundial. Lemos et al. (2018) lo hicieron para el periodo 2031-2060 usando el modelo de olas WAM bajo el escenario RCP8.5. Estos autores proyectan un aumento de la potencia undimotriz en latitudes medias y altas, pero una bajada en la zona del Atlántico Norte. En Reguero et al. (2017), también se analizaron los cambios futuros de la potencia undimotriz pero basándose en los cambios de temperatura superficial del mar que se esperan considerando las observaciones del pasado. Observaron un aumento de la potencia undimotriz a escala global de 0.4 % por año desde 1948 y se espera un aumento global del 32% bajo el RCP2.6 y del 122% bajo el RCP8.5, frente al periodo 1986-2005, para finales del siglo XXI.

## 1.5. Objetivos

El principal objetivo de este TFM es caracterizar y clasificar el recurso undimotriz en el Golfo de Vizcaya (**Figura 3**) en un contexto de cambio climático. Con este propósito se va a cuantificar la cantidad de energía que contiene el oleaje en esta zona durante un periodo histórico y a lo largo del siglo XXI. Además, se clasificará el recurso undimotriz atendiendo a diferentes criterios para las próximas décadas. Se toma este período porque es cuando se espera que se pueda aprovechar comercialmente el recurso undimotriz y porque también permite tener en cuenta el posible efecto del cambio climático sobre el recurso. Finalmente, también se analizará la potencia eléctrica que podrían generar dos tipos de WECs en las zonas costeras del Golfo de Vizcaya.



*Figura 3. Zona de estudio señalada con un rectángulo rojo. Fuente: Google Earth*

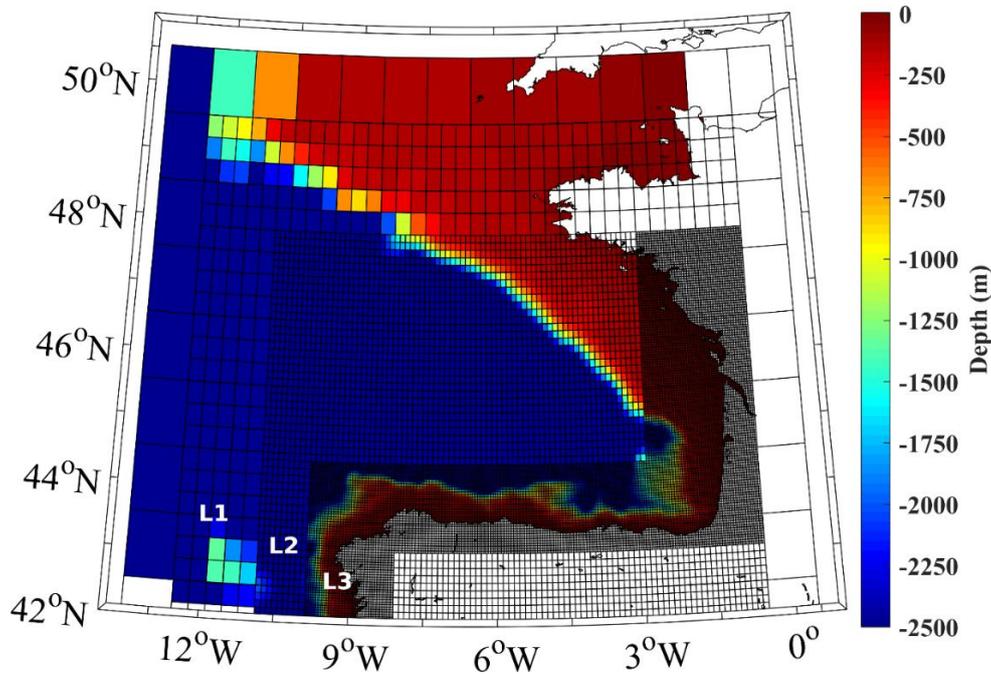
## 2. Datos y métodos

### 2.1. Datos

Para cuantificar la cantidad de energía que contiene el oleaje, es necesario obtener datos de altura significativa de ola ( $H_s$ ) y periodo pico ( $T_p$ ). Son dos parámetros de la representación espectral del oleaje, es decir, de la energía de las olas en función de su frecuencia.  $T_p$  corresponde al periodo de las olas de mayor energía y  $H_s$  es la media aritmética de la altura del tercio de olas más altas registradas y se relaciona con la energía de todo el oleaje (considerando todas las frecuencias de olas). Para llevar a cabo este TFM se utilizaron datos de  $T_p$  y  $H_s$  generados en un trabajo previo (Ribeiro et al., 2021). A continuación, se explica de forma breve qué simulaciones se realizaron con el propósito de obtener datos de estos parámetros a una alta resolución espacial. Una información más detallada se puede encontrar en dicho trabajo.

Los datos de  $H_s$  y  $T_p$  se obtuvieron gracias a simulaciones realizadas con WAVEWATCH III (WWIII) por parte de la *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation* (CSIRO) (Hemer et al., 2015). Estos datos están disponibles en la base de datos en línea de CSIRO. En esta base de datos están disponibles simulaciones realizadas con varios modelos climáticos globales (*Global Climate Models*, GCMs). Inicialmente lo que se hizo fue comprobar que GCMs ofrecían unos datos más precisos en la zona de interés, que fue el Arco Atlántico (35-60°N y 0-20°W). Lo que se hizo fue comparar las salidas de WWIII forzadas con los diferentes GCMs con las salidas de WWIII pero forzadas con datos de la base de datos de reanálisis CFSR (*Climate Forecast System Reanalysis*) durante el periodo histórico 1979-2005. Se comprobó que el GCM que modeliza un oleaje más parecido a los resultados de reanálisis es MIROC5 (*Model for Interdisciplinary Research on Climate*). Se consideraron los datos para los dos periodos futuros bajo el escenario RCP8.5 ofrecidos por CSIRO: un futuro cercano (2026-2045) y uno lejano (2081-2099). Estos datos tienen una resolución espacial de 1° x 1°, lo cual es una resolución baja para poder alcanzar los objetivos de este TFM. En Ribeiro et al. (2021) lo que se hizo fue reducir esta resolución espacial (*downscaling*) de forma dinámica empleando el modelo SWAN. Este modelo se alimentó con datos de viento del modelo climático regional (*Regional Climate Model*, RCM) MIROC5-CCLM4-8-17 del proyecto EURO-CORDEX (*European branch of Coordinated Regional Downscaling Experiment*) y, en las fronteras abiertas oceánicas, con los datos oceánicos de gruesa resolución obtenidos de WWIII con el GCM MIROC5, que es el que mejor reproduce el oleaje en nuestra zona de análisis. Después de realizar este *downscaling*, se obtuvieron datos de  $H_s$  y  $T_p$  con una diferente

resolución espacial dependiendo de la zona (**Figura 4**):  $1/3^\circ$  en la zona L1 (42-49.5°N y 0.5-12.5°W),  $1/9^\circ$  en la zona L2 (42-47.8°N y 0.5-10.8°W) y  $1/27^\circ$  en la zona L3 (hasta 100 km de la costas españolas y francesas del Golfo). La resolución temporal de los datos de  $H_s$  y  $T_p$  obtenidos es de 1 hora.



*Figura 4. Batimetría de la zona de estudio y dominios empleados en las simulaciones con SWAN.*

## 2.2. Métodos

### 2.2.1. Potencia del oleaje

La potencia del oleaje (*Wave Power*, WP) es la potencia llevada por las olas por unidad de longitud en la dirección de propagación. Se expresa en  $\text{kW}\cdot\text{m}^{-1}$  y se calcula según la **Fórmula 1**:

$$WP = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_e \quad (1)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del agua ( $1025 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ),  $g$  la aceleración de la gravedad ( $9.81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ),  $H_s$  la altura significativa del oleaje y  $T_e$  el periodo energético, que se estima a partir del periodo de pico  $T_p$  según la **Fórmula 2**:

$$T_e = \alpha \cdot T_p \quad (2)$$

El valor de  $\alpha$  depende de la forma del espectro del oleaje. En este estudio se considera  $\alpha = 0.9$  que proviene de asumir un espectro de oleaje JONSWAP estándar con un factor de mejora de pico de  $\gamma=3.3$  (Ribeiro et al., 2021).

### 2.2.2. Clasificación del recurso undimotriz

Para clasificar el recurso undimotriz en el Golfo de Vizcaya, se definieron una serie de índices que además de tener en cuenta la riqueza del recurso de las olas tiene en cuenta otros aspectos que son importantes como, por ejemplo, la estabilidad del recurso a lo largo del año, los posibles riesgos derivados del oleaje extremo sobre los dispositivos que se instalen, o factores que condicionan el gasto económico como son la profundidad y la distancia a costa. Una vez definidos estos índices, se aplicó un método Delphi. Esta técnica consiste en preguntar a expertos, ingenieros y científicos (en este caso fueron 15) del campo de la energía undimotriz cuales son, bajo su criterio, los parámetros que pueden influir más sobre la viabilidad de instalar cualquier tipo de WECs.

A continuación, se describen los 7 índices que se definieron para clasificar el recurso undimotriz:

- El recurso energético se define a través del índice WP ( $\text{kW}\cdot\text{m}^{-1}$ ) que hace referencia al potencial de oleaje calculado con la **Fórmula 1**.
- Además del índice WP, la riqueza del recurso se estima con la operatividad. Se determina a través del índice DWNT (*Downtime*) que representa el porcentaje de tiempo, sobre el periodo considerado, donde el aparato no funciona y entonces no genera electricidad. De forma general, se considera que los aparatos funcionan solo cuando  $H_s$  tiene valores entre 1 m y 8 m. En efecto, olas demasiado pequeñas no permiten la producción de energía, y olas demasiado altas pueden dañar el WEC si está en funcionamiento (por lo que se apaga en esta situación).
- La estabilidad del recurso se cuantificó empleando dos índices: uno de variabilidad temporal ( $C_v$ ) y otro de variabilidad mensual ( $M_v$ ). El primero (**Fórmula 3**) corresponde a la división entre la desviación estándar del WP por el promedio de este WP sobre el periodo de tiempo considerado. El segundo (**Fórmula 4**) corresponde a la resta entre el WP del mes más productivo ( $WP_{M1}$ ) y el menos productivo ( $WP_{M12}$ ), dividida por el WP promedio.

$$C_v = \frac{\sigma}{\overline{WP}} \quad (3)$$

$$M_v = \frac{WP_{M1} - WP_{M12}}{\overline{WP}} \quad (4)$$

- Además, se definió un índice Risk (m) asociado al riesgo que corresponde al valor promedio de altura de la ola más extrema anual (que por supuesto podría dañar o romper el aparato).
- En relación al coste económico se tuvieron en cuenta la profundidad (WD) (m) y la distancia a la costa (DC) (°).

Estos 7 índices tienen unidades y magnitudes muy diferentes, por lo que es necesario hacer una normalización para poder compararlos entre sí. Así, todos los índices tendrán un valor entre 0 (peor) y 1 (mejor) y además serán adimensionales. Los índices fueron normalizados según 10 categorías, salvo para WD y DC, para los que se consideraron 5 categorías (estos factores no cambian a lo largo del tiempo), como se ve en la **Tabla 1** y la **Tabla 2**.

*Tabla 1. Criterios de normalización de los índices WP, C<sub>v</sub>, M<sub>v</sub>, DWNT y Risk.*

Valor normalizado	WP (kW.m <sup>-1</sup> )	C <sub>v</sub>	M <sub>v</sub>	DWNT (%)	Risk (m)
0/9	< 10	> 1.9	> 2.5	> 90	> 27
1/9	10-20	1.7-1.9	2.25-2.5	90-80	25.5-27.0
2/9	20-30	1.5-1.7	2.0-2.25	80-70	24.0-25.5
3/9	30-40	1.3-1.5	1.75-2.0	70-60	22.5-24.0
4/9	40-50	1.1-1.3	1.5-1.75	60-50	21.0-22.5
5/9	50-60	0.9-1.1	1.25-1.5	50-40	19.5-21.0
6/9	60-70	0.7-0.9	1.0-1.25	40-30	18.0-19.5
7/9	70-80	0.5-0.7	0.75-1.0	30-20	16.5-18.0
8/9	80-90	0.3-0.5	0.5-0.75	20-10	15.0-16.5
9/9	> 90	< 0.3	< 0.5	< 10	< 15.0

*Tabla 2. Criterios de normalización de los índices WD y DC.*

Valor normalizado	WD (m)	DC (°)
0	> 500	> 4
0.25	100-500	3-4
0.5	50-100	2-3
0.75	25-50	0.5-2
1	< 25	< 0.5

Posteriormente, siguiendo el método Delphi se preguntó a los 15 expertos qué peso darían a cada uno de estos índices para formar un único índice (**Tabla 3**).

*Tabla 3. Peso de cada índice normalizado.*

Índice	Peso
WP	0.44
C <sub>v</sub>	0.10
M <sub>v</sub>	0.05
DWNT	0.10
Risk	0.14
WD	0.07
DC	0.10

Al final, podemos crear un índice único (**Fórmula 5**) que tiene en cuenta los 7 índices elegidos I<sub>i</sub>, cada uno con su peso W<sub>i</sub>:

$$I = \sum_{i=1}^7 W_i I_i \quad (5)$$

Este índice tiene valores entre 0 y 1. Como último paso se establecieron 7 categorías diferentes (**Tabla 4**) para clasificar la energía undimotriz que dependen del valor final del índice I.

*Tabla 4. Clasificación del potencial undimotriz.*

Clasificación	Valores de I	Potencial del recurso
1	≤ 0.2	Pobre
2	] 0.2 ; 0.3 ]	Marginal
3	] 0.3 ; 0.4 ]	Suficiente
4	] 0.4 ; 0.5 ]	Bueno
5	] 0.5 ; 0.6 ]	Excelente
6	] 0.6 ; 0.7 ]	Sobresaliente
7	> 0.7	Magnífico

### 2.2.3. Índices para analizar los WECs

Aparte de caracterizar el recurso de la energía undimotriz de una región también es necesario analizar qué cantidad de esa energía puede ser transformada en electricidad. Para ello es necesario tener en cuenta que la tecnología de los WECs es otro factor importante a tener en cuenta. Además, se necesita conocer la potencia generada por cada tipo de WEC dependiendo de las condiciones de oleaje que se dan. La capacidad de cada WEC para generar electricidad a partir del recurso undimotriz (P<sub>E</sub>) depende de su matriz de potencia. Es una matriz que

representa el rango de estados de mar ( $H_s$ ,  $T_p$ ) en los cuales opera el WEC.  $P_E$  se expresa en kW siguiendo la **Fórmula 6**.

$$P_E = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{n_T} \sum_{j=1}^{n_H} p_{ij} P_{ij} \quad (6)$$

donde  $P_{ij}$  es la potencia eléctrica obtenida del elemento  $[i ; j]$  de la matriz de potencia del WEC,  $p_{ij}$  es la probabilidad de ocurrencia (expresada en porcentaje) de un determinado estado de mar para el elemento  $[i ; j]$  de la matriz de potencia, y  $n_T$  y  $n_H$  son los números de intervalos de período pico y altura significativa considerados, respectivamente.

La matriz de potencia de un aparato tiene un valor máximo ( $P_{MAX}$ ) para ciertos valores de  $H_s$  y  $T_p$ . Por lo tanto,  $P_{MAX}$  se define como la potencia eléctrica máxima que puede extraer el WEC con el estado de mar ideal para ello. Así, conociendo  $P_E$  y  $P_{MAX}$ , podemos definir el factor de carga  $\varepsilon$  (**Fórmula 7**), que es la división de los dos. Este índice nos da información sobre el porcentaje de potencia recogida frente al máximo que se podría recoger con este aparato.

$$\varepsilon (\%) = 100 \cdot \frac{P_E}{P_{MAX}} \quad (7)$$

Otra cosa que hay que tener en cuenta es que los WECs tienen longitudes ( $L$ ) diferentes, por eso la unidad del WP es  $\text{kW} \cdot \text{m}^{-1}$ . Así, otro índice interesante es la eficiencia, que permite conocer el rendimiento del aparato a la hora de convertir en electricidad la energía del oleaje, es decir, nos da la potencia generada por unidad de longitud del WEC. La eficiencia se calcula mediante la **Fórmula 8**.

$$\text{Eficiencia} (\%) = 100 \cdot \frac{P_E}{WP \cdot L} \quad (8)$$

A diferencia de otras energías marinas, como la eólica marina, la tecnología de la energía undimotriz no ha conseguido converger en un único tipo de dispositivo. De hecho, se están desarrollando diferentes tecnologías, aunque todas ellas siguen teniendo un TRL (*Technological Readiness Level*) bajo (entre 5 y 7, [IRENA, 2021](#)). Por esta razón en este TFM, se analizará la potencia eléctrica, el factor de carga y la eficiencia de dos WECs: el AquaBuoy y el Pelamis, cuyas características se definen en la **Tabla 5**. Elegimos estos aparatos porque se pueden instalar a una profundidad de 50-100 m, una profundidad mayor que para otros WECs que se deben instalar más cerca de costa.

**Tabla 5.** Características de los WECs AquaBuoy y Pelamis.

WEC	$P_{MAX}$ (kW)	L (m)	Tipo
AquaBuoy	250	6	Absorbedor puntual
Pelamis	750	150	Atenuador

Así, Pelamis y AquaBuoy se adecuan bien a la resolución espacial de los datos que tenemos en este trabajo. Las **Tabla 6** y **Tabla 7** muestran las matrices de potencia de un AquaBuoy y un Pelamis, respectivamente. Estas matrices de potencia se recogen en estudios previos, como por ejemplo [Kamranzad and Hadadpour \(2020\)](#) o [Silva et al. \(2013\)](#). El estudio se hará para la zona del Golfo de Vizcaya que se solapa con la zona L3 (**Figura 4**). Estos datos tienen una resolución espacial muy alta de  $1/27^\circ$ .

**Tabla 6.** Matriz de potencia (en kW) del WEC AquaBuoy.

	$T_p$ (s)												
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
$H_s$ (m)	1	0	8	11	12	11	10	8	7	0	0	0	0
1.5	13	17	25	27	26	23	19	15	12	12	12	7	
2	24	30	44	49	47	41	34	28	23	23	23	12	
2.5	37	47	69	77	73	64	54	43	36	36	36	19	
3	54	68	99	111	106	92	77	63	51	51	51	27	
3.5	0	93	135	152	144	126	105	86	70	70	70	38	
4	0	0	122	176	198	188	164	137	112	91	91	49	
4.5	0	0	223	250	239	208	173	142	115	115	115	62	
5	0	0	250	250	250	250	214	175	142	142	142	77	
5.5	0	0	250	250	250	250	250	211	172	172	172	92	

*Tabla 7. Matriz de potencia (en kW) del WEC Pelamis.*

		T <sub>p</sub> (s)																	
		5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	10.5	11	11.5	12	12.5	13	
H <sub>s</sub> (m)	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	1	0	22	29	34	37	38	38	37	35	32	29	26	23	21	0	0	0	
	1.5	32	50	65	76	83	86	86	83	78	72	65	59	53	47	42	37	33	
	2	57	88	115	136	148	153	152	147	138	127	116	104	93	83	74	66	59	
	2.5	89	138	180	212	231	238	238	230	216	199	181	163	146	130	116	103	92	
	3	129	198	260	305	332	340	332	315	292	266	240	219	210	188	167	149	132	
	3.5	0	270	354	415	438	440	424	404	377	362	326	299	260	230	215	202	180	
	4	0	0	462	502	540	546	530	499	475	429	384	366	339	301	267	237	213	
	4.5	0	0	544	635	642	648	628	590	562	528	473	432	382	356	338	300	266	
	5	0	0	0	739	726	731	707	687	670	607	557	521	472	417	369	348	328	
	5.5	0	0	0	750	750	750	750	750	737	667	658	586	530	496	446	395	355	
	6	0	0	0	0	750	750	750	750	750	750	711	633	619	558	512	470	415	
	6.5	0	0	0	0	750	750	750	750	750	750	750	743	658	621	579	512	481	
	7	0	0	0	0	0	750	750	750	750	750	750	750	750	750	676	613	584	525
	7.5	0	0	0	0	0	0	750	750	750	750	750	750	750	750	750	686	622	593
	8	0	0	0	0	0	0	0	750	750	750	750	750	750	750	750	750	690	625

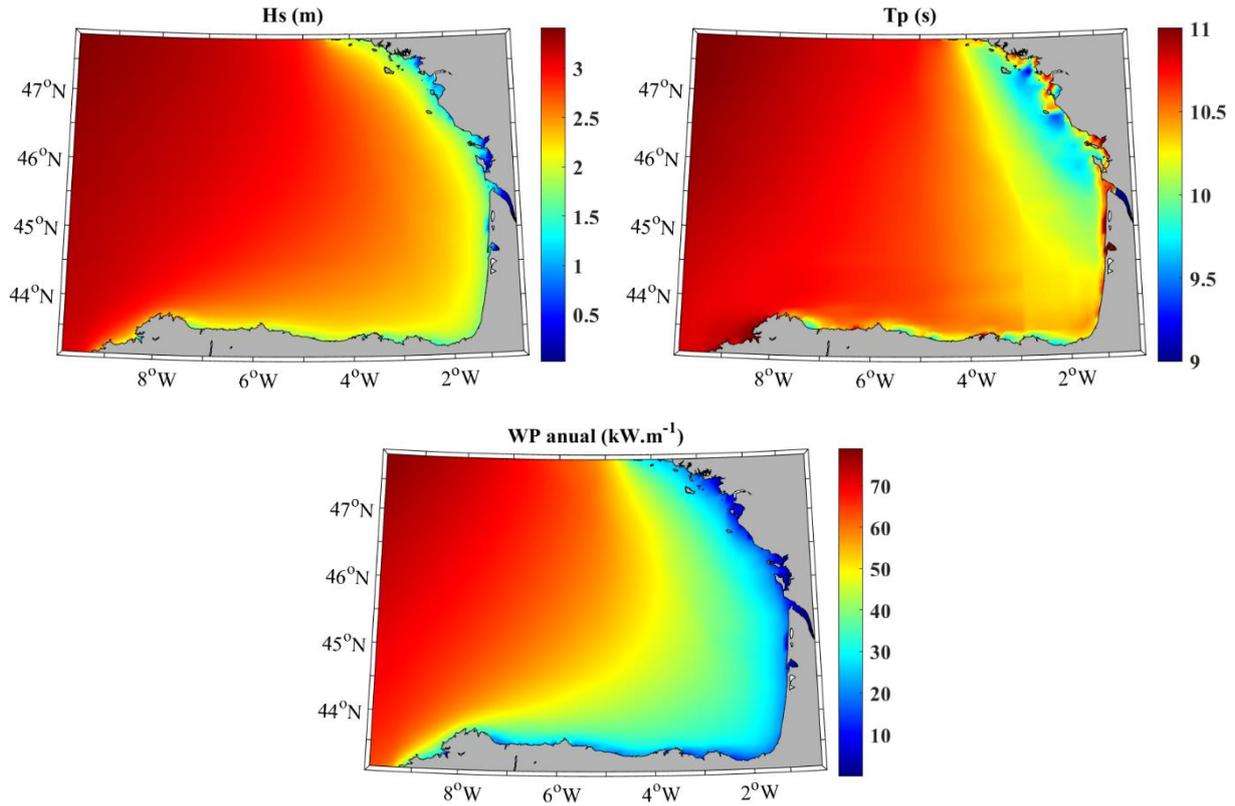
### 3. Resultados

Los datos de  $H_s$  y  $T_p$  simulados permiten calcular el WP en el Golfo de Vizcaya para 3 periodos distintos: histórico (1979-2005), futuro cercano (2026-2045) y futuro lejano (2081-2099). Esto permitirá analizar la variación anual y estacional de WP para los distintos periodos. Después, se analizarán los 7 índices normalizados que caracterizan el recurso undimotriz en el Golfo de Vizcaya y se procederá a la clasificación del recurso. Finalmente, se analizará la potencia eléctrica que se podrá generar con dos WECs (AquaBuoy y Pelamis) en la costa noroeste de España y la costa oeste de Francia.

#### 3.1. Caracterización del recurso undimotriz

##### 3.1.1. Variación del recurso anual

Se caracteriza el clima marítimo de la zona de estudio durante el período histórico a través de  $H_s$  y  $T_p$  que son, además, los parámetros que definen el WP (**Figura 5**). Vemos que  $H_s$  tiene valores más altos cuanto más lejos de las costas (hasta  $\sim 3.5$  m). En cuanto a  $T_p$ , tiene valores  $\sim 11$  s en todo el Golfo de Vizcaya salvo en una banda bastante larga adyacente a las costas francesas, donde sus valores decrecen hasta menos de 10 m. Estos parámetros permiten representar el WP promedio anual para este periodo. WP presenta los valores más bajos cerca de las costas ( $\sim 10 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$ ) y va creciendo gradualmente (hasta  $\sim 70 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$ ) mar a dentro.

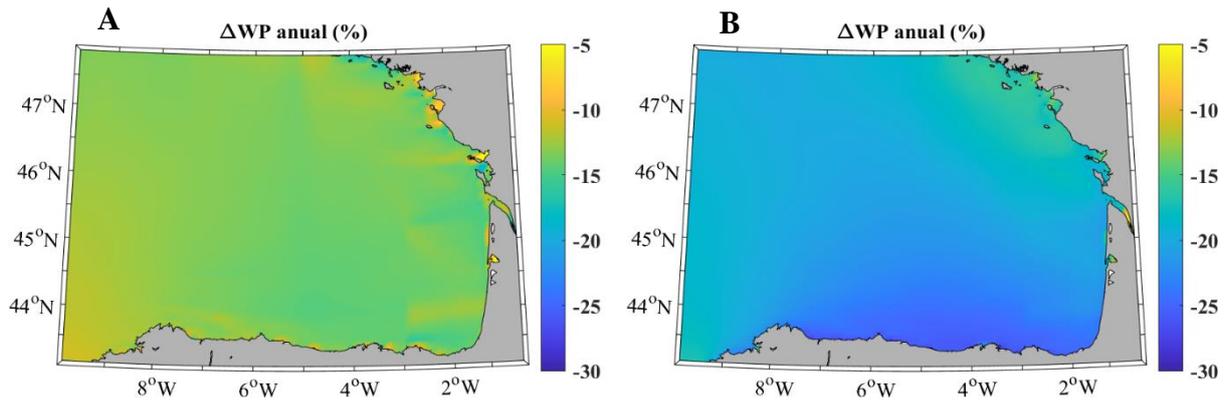


**Figura 5.**  $H_s$ ,  $T_p$  y WP anuales para el periodo histórico (1979-2005).

Una vez caracterizado el clima marítimo y el recurso undimotriz de la zona de estudio durante el periodo histórico, se analizó cuál es la variación que se espera en términos de WP durante el futuro cercano y lejano (**Figura 6**). Los cambios futuros respecto del periodo histórico, se representan mediante mapas de diferencia (expresados en %) entre el WP del futuro considerado y el del periodo histórico, usando la **Fórmula 9**.

$$\Delta WP (\%) = 100 \cdot \frac{WP_{futuro} - WP_{histórico}}{WP_{histórico}} \quad (9)$$

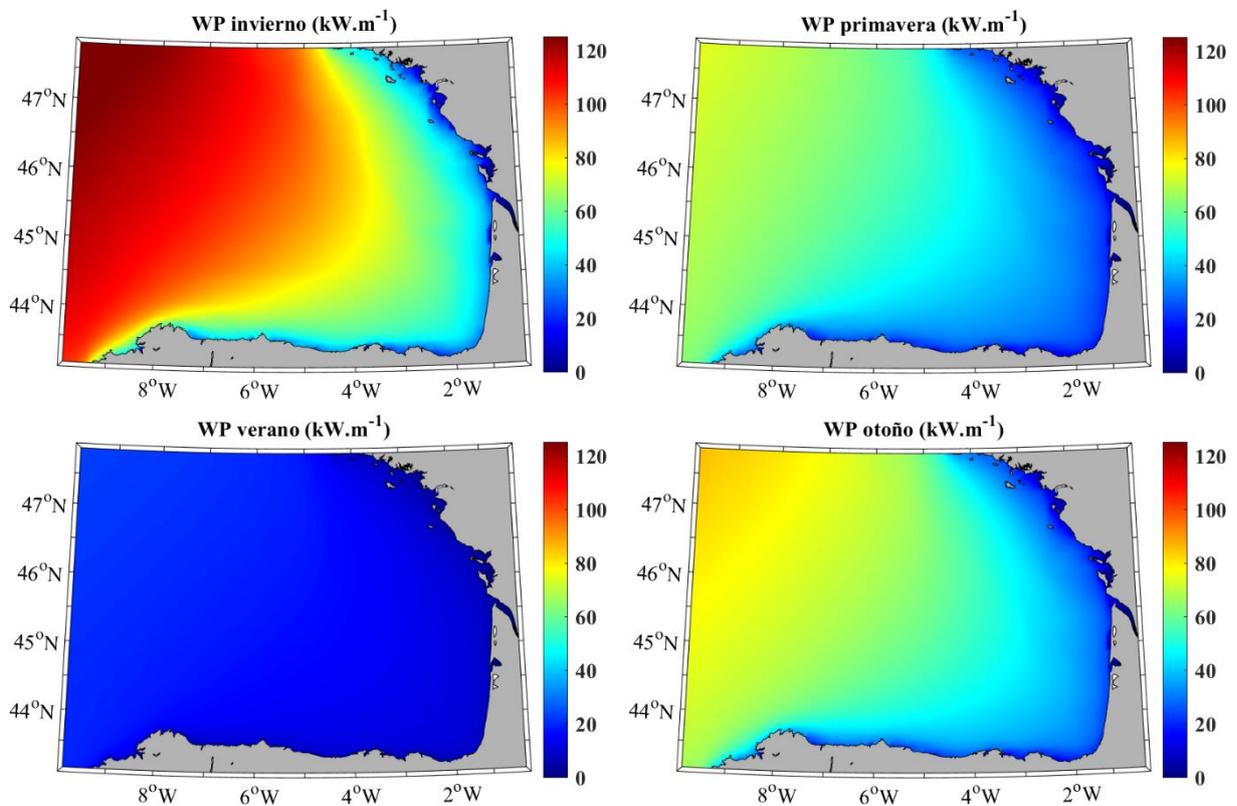
Un valor negativo significa una disminución futura del WP y viceversa. El  $\Delta WP$  anual para el futuro cercano y lejano se representa en las **Figura 6A** y **Figura 6B**, respectivamente. Se proyecta una disminución de la potencia undimotriz en todo en Golfo de Vizcaya en el futuro independientemente del periodo considerado. Esta disminución será de aproximadamente el 15% para el futuro cercano y del 25% para el futuro lejano.



**Figura 6.** Variación del potencial del oleaje ( $\Delta WP$ ) anual de los futuros (A) cercano (B) lejano.

### 3.1.2. Variación del recurso estacional

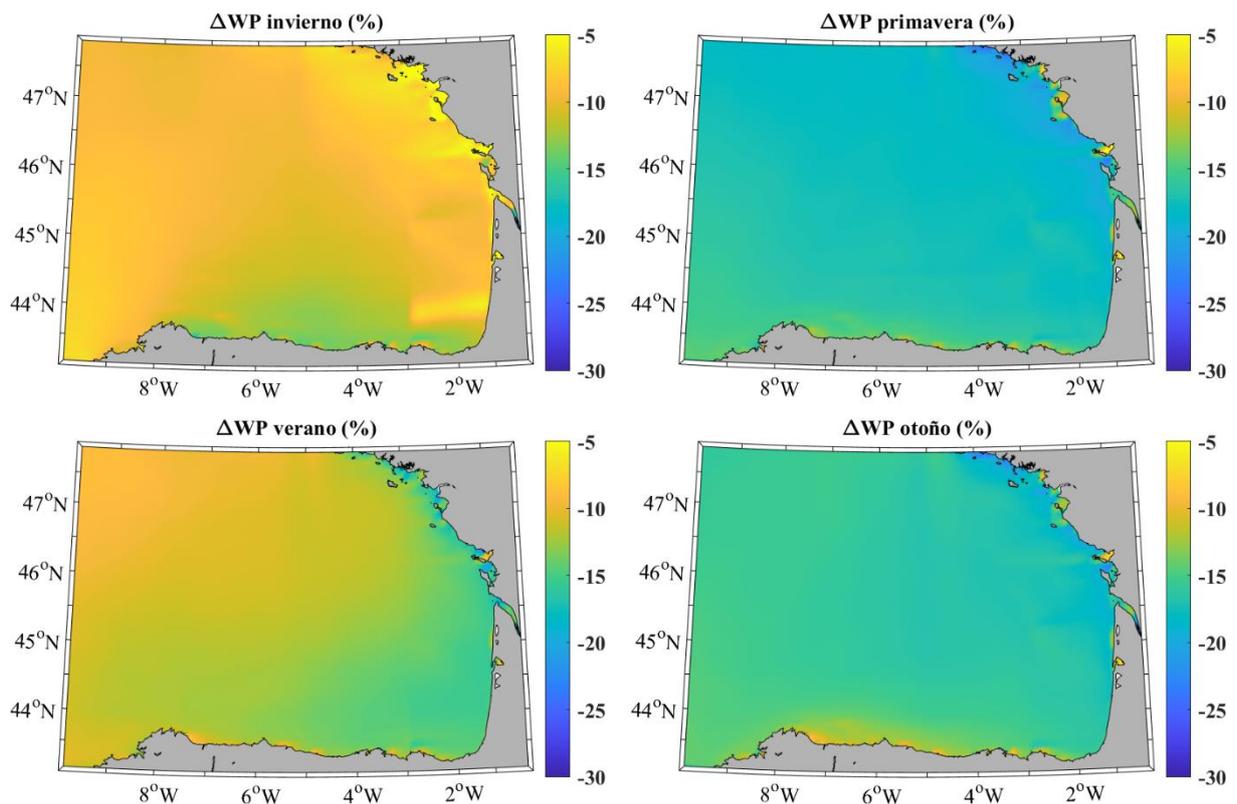
La variabilidad estacional de WP para el periodo histórico se representa en la **Figura 7** considerando: invierno (diciembre-febrero), primavera (marzo-mayo), verano (junio-agosto) y otoño (septiembre-noviembre). Como para el WP anual, el WP estacional es siempre mayor mar adentro, lejos de las costas. Además, la potencia undimotriz es claramente mayor en invierno (hasta  $\sim 120 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$ ), menor en verano ( $\sim 20 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$ ), e intermedia en primavera y otoño.



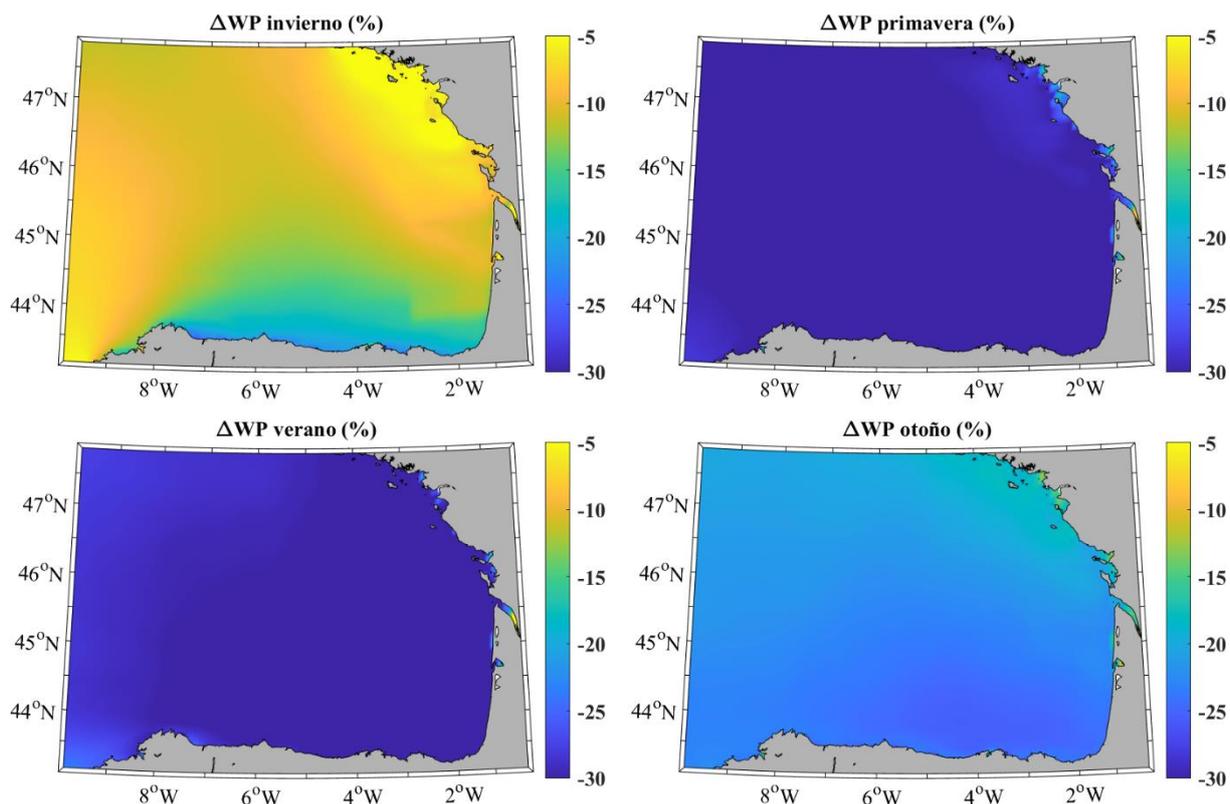
**Figura 7.** WP estacionales para el periodo histórico (1979-2005).

También se representa el  $\Delta WP$  (ver **Fórmula 9**) estacional para los futuros cercano (**Figura 8**) y lejano (**Figura 9**). El patrón general es el mismo que para el  $\Delta WP$  anual: independientemente de la estación o el periodo futuro considerado, hay una disminución de la potencia undimotriz. Esta disminución es mayor para el futuro lejano que para el cercano.

WP disminuye ligeramente ( $\sim -5\%$ ) en invierno en casi todo el Golfo de Vizcaya independientemente del periodo futuro considerado, salvo en la costa española donde será de  $-15\%$  para el futuro cercano y de  $-20\%$  para el lejano. La disminución en primavera será mayor y casi uniforme en todo el Golfo con valores de en torno a  $-20\%$  para el futuro cercano y de  $-30\%$  para el lejano. Considerando la estación de verano,  $\Delta WP$  es de  $-10\%$  cerca de las costas y de  $-15\%$  en las zonas más alejadas en el futuro cercano mientras que en el futuro lejano se proyecta un descenso de WP uniforme en todo el Golfo del  $-30\%$ . El patrón de otoño es el mismo que el de primavera: un descenso homogéneo en toda la zona, de en torno a  $-15\%$  para el futuro cercano y de  $-20\%$  para el lejano.



*Figura 8.  $\Delta WP$  estacionales para el futuro cercano (2026-2045).*

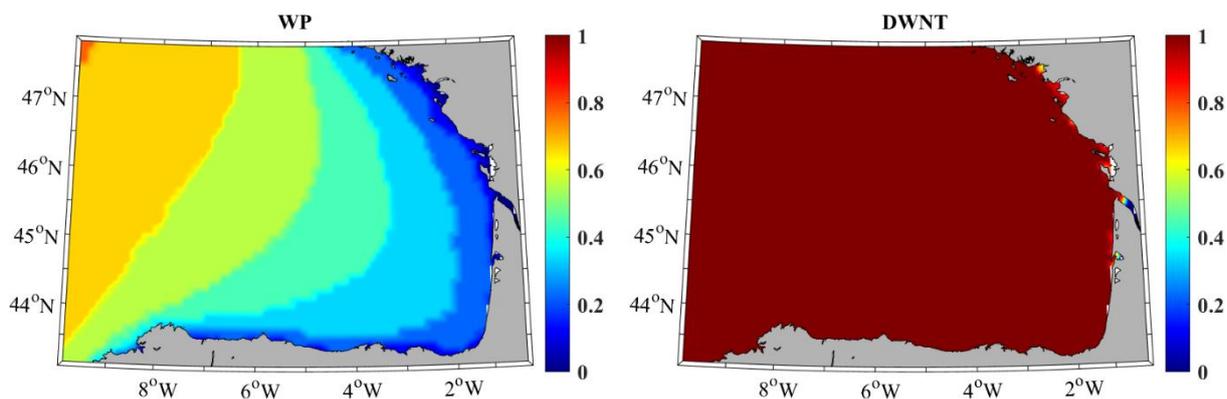


*Figura 9. ΔWP estacionales para el futuro lejano (2081-2099).*

### 3.2. Clasificación del recurso undimotriz

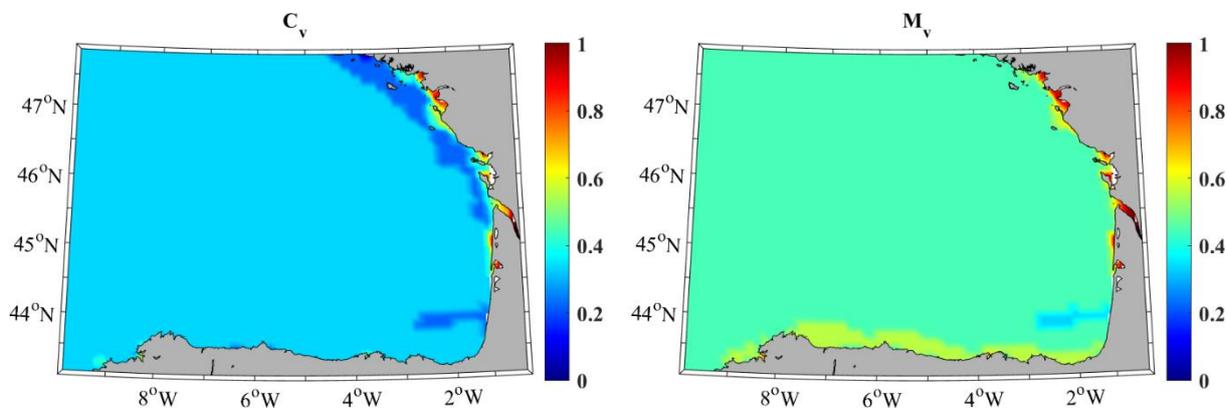
Aunque las variaciones en el recurso se analizaron tanto para el futuro cercano como para el lejano, la clasificación del recurso undimotriz se hizo sólo para el futuro cercano (2026-2045) ya que se espera que el despegue tecnológico de este tipo de recurso renovable ocurra durante los próximos años/décadas.

En primer lugar, la **Figura 10** muestra los índices relacionados con el recurso (WP) y la operatividad (DWNT) normalizados siguiendo la **Tabla 1**. Se observa que el WP se divide en franjas que siguen aproximadamente la forma de la costa, y es mayor cuanto más lejos de tierra (hasta alcanzar un valor de  $\sim 0.7$ ). En cuanto al DWNT, tiene un valor constante y próximo a 1 en todo el Golfo.



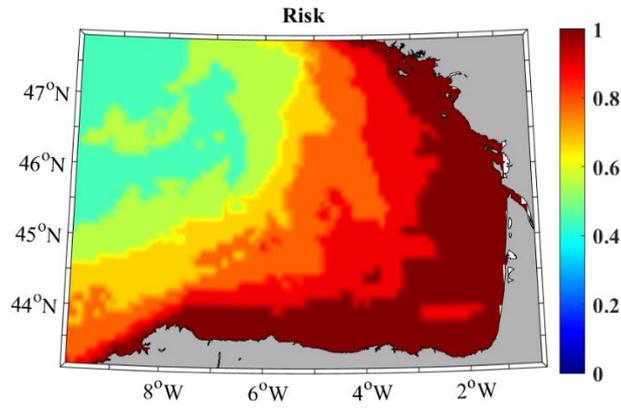
**Figura 10.** Índices WP y DWNT normalizados para el futuro cercano (2026-2045).

La estabilidad del recurso se representa en la **Figura 11** mediante los valores normalizados de la variabilidad temporal  $C_v$  (ver **Fórmula 3**) y la variabilidad mensual  $M_v$  (ver **Fórmula 4**). La variabilidad temporal muestra valores bajos,  $\sim 0.3$ , en toda la zona, siendo aún menores cerca de la costa francesa entre el estuario del río Garona y la región Britania, y también en una franja horizontal ( $44^\circ\text{N}$ ) en el País Vasco francés entre  $1^\circ\text{W}$  y  $3^\circ\text{W}$ . En cuanto a la variabilidad mensual, tiene un valor de  $\sim 0.5$  en casi todo el Golfo, siendo un poco mayor ( $\sim 0.6$ ) cerca de la costa española y menor ( $\sim 0.4$ ) en la franja horizontal de la que hablamos antes.



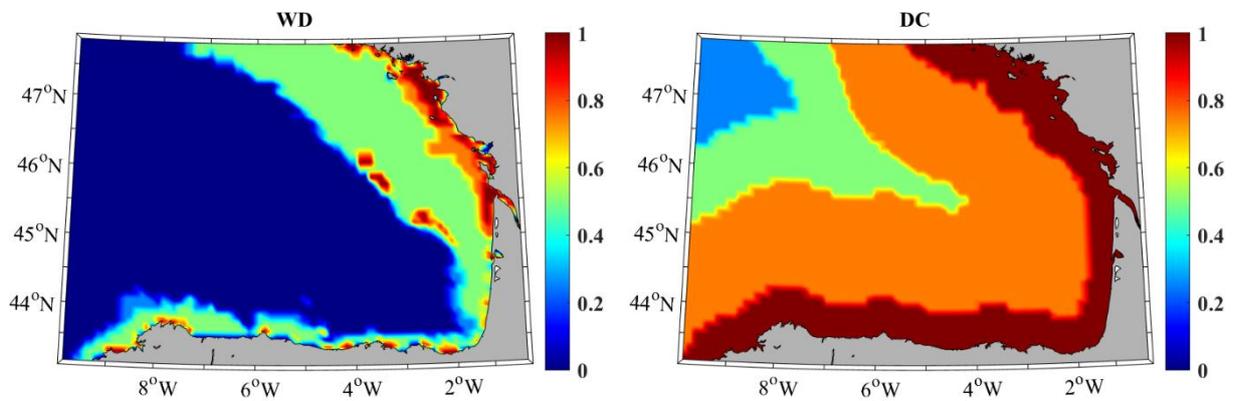
**Figura 11.** Índices  $C_v$  y  $M_v$  normalizados para el futuro cercano (2026-2045).

El análisis del riesgo como consecuencia de eventos extremos se hizo en términos del índice Risk (**Figura 12**). El riesgo es menor (valores normalizados más altos) cerca de las costas y mayor al alejarse hacia el océano abierto.



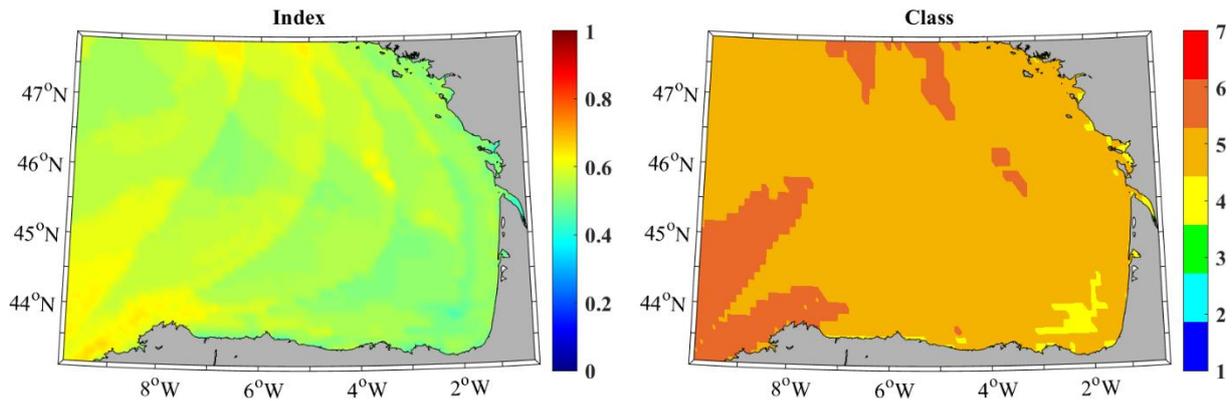
*Figura 12. Índice Risk normalizado para el futuro cercano (2026-2045).*

Finalmente, la **Figura 13** muestra los dos índices que tienen en cuenta factores económicos, WD y DC. Estos valores no dependen del periodo de tiempo considerado (histórico o futuro) y se normalizaron según la **Tabla 2**. Como era de esperar, los valores de profundidad normalizada (WD) son mayores cerca de las costas, aunque es interesante destacar que la plataforma continental es mucho más larga en la costa francesa que en la española.



*Figura 13. Índices WD y DC normalizados para el futuro cercano (2026-2045).*

A partir de estos 7 índices normalizados y su peso dado por la **Tabla 3**, se calcula el índice final (**Figura 14**) y se clasifica el recurso en las 7 clases definidas en la **Tabla 4**. La mayoría del Golfo de Vizcaya se clasifica como excelente (5/7). Sin embargo, una parte cerca del País Vasco se clasifica solo como buena (4/7) y unas zonas bastante grandes cerca de Galicia y la Britania francesa como sobresaliente (6/7).



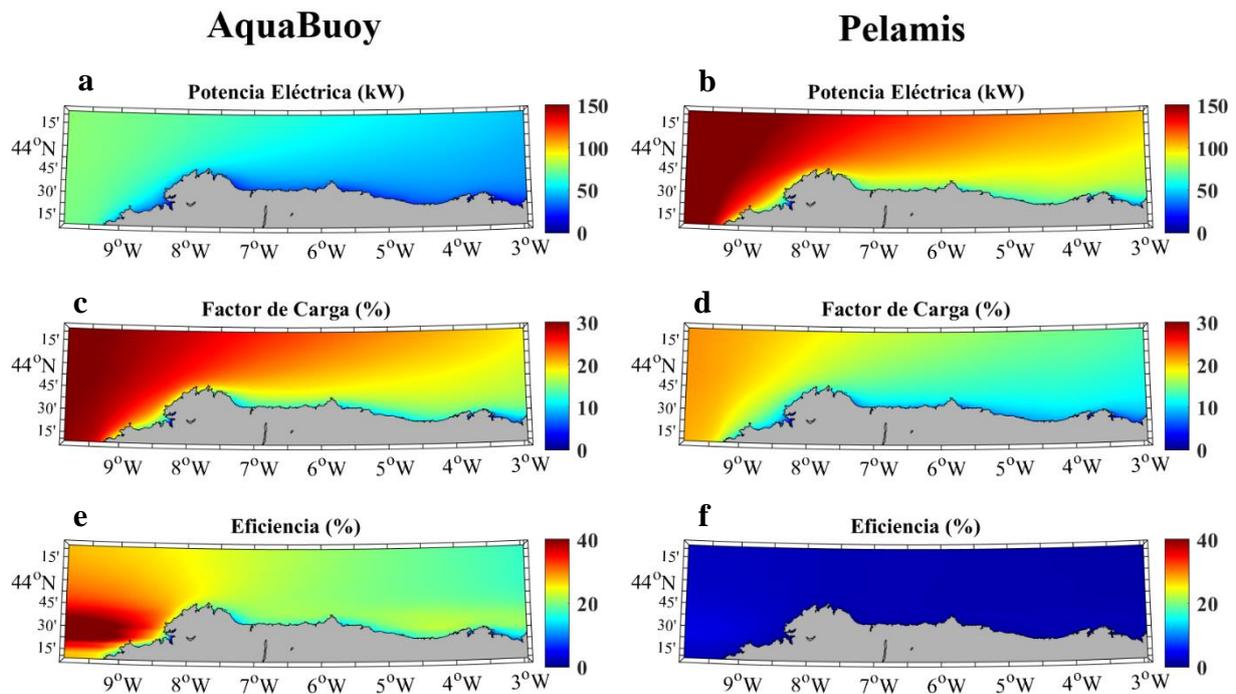
**Figura 14.** Índice final y su clasificación para el futuro cercano (2026-2045).

### 3.3. Potencia generada por los WECs

A continuación, se va a analizar la potencia eléctrica generada por dos WECs: AquaBuoy y Pelamis. El análisis de  $P_E$  se va a basar en dos magnitudes: el factor de carga  $\varepsilon$  (ver **Fórmula 7**) y la eficiencia (ver **Fórmula 8**). Es importante señalar que estos cálculos se han realizado con datos de alta resolución espacial ( $1/27^\circ$ ) y que además se han seleccionado dos WECs que se pueden instalar a grandes profundidades.

#### 3.3.1. Costa española del Golfo de Vizcaya

La **Figura 15** indica los valores de potencia eléctrica, factor de carga y eficiencia para los dos aparatos estudiados en la costa norte de España. En general, la potencia eléctrica es mayor en Galicia y menor en Asturias, Cantabria y País Vasco, además de ser mayor cuanto más lejos de la costa. La  $P_E$  de AquaBuoy (**Figura 15a**) es más baja que la de Pelamis. Así, llega hasta 75 kW en Galicia, frente a 150 kW para el Pelamis (**Figura 15b**) en la misma zona. En cuanto al factor de carga, sigue la misma tendencia que  $P_E$  para los dos aparatos: es mayor en Galicia y cerca de la costa. Sin embargo, los valores son más altos para el AquaBuoy (**Figura 15c**, ~ 30% en Galicia) que para el Pelamis (**Figura 15d**, ~ 20% en Galicia). Finalmente, la eficiencia del AquaBuoy (**Figura 15e**) es mayor cerca de las costas gallegas (~ 40%) y menor en otras zonas (~ 20%). Además, la eficiencia del Pelamis (**Figura 15f**) es mucho menor (<10%) que la del AquaBuoy y casi constante en toda la zona.

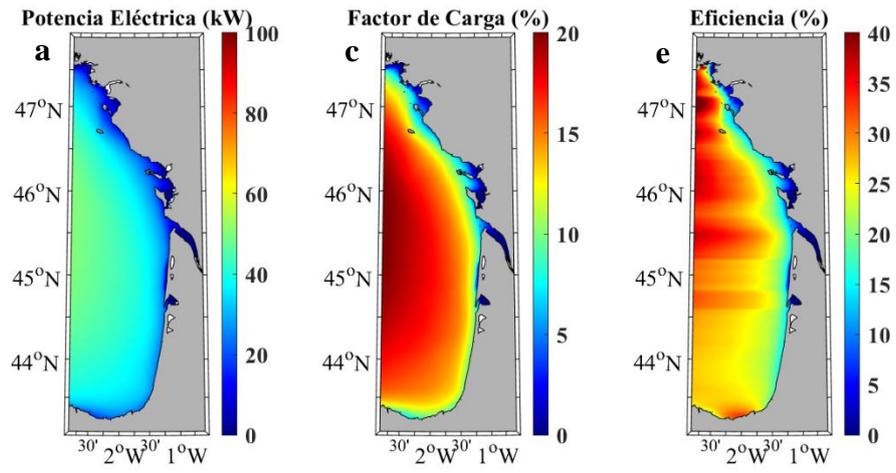


*Figura 15.  $P_E$ ,  $\varepsilon$  y Eficiencia del AquaBuoy (columna izquierda) y el Pelamis (columna derecha) en la costa española en el futuro cercano (2026-2045).*

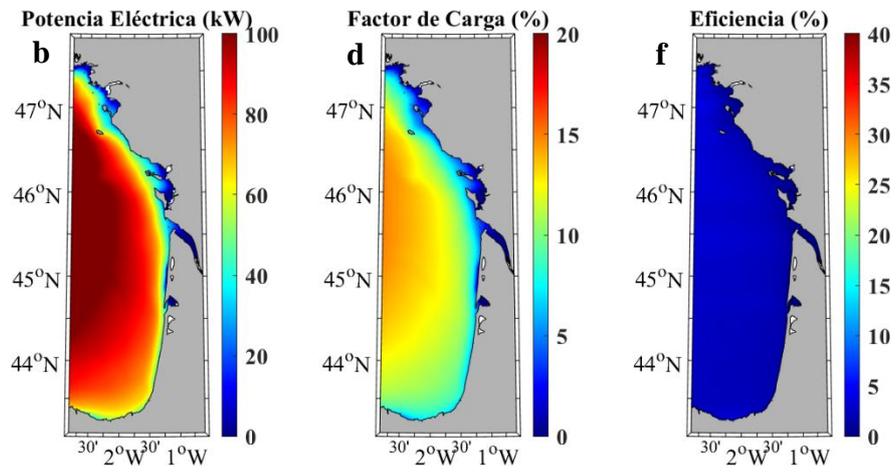
### 3.3.2. Costa francesa del Golfo de Vizcaya

La **Figura 16** representa los mismos índices que la **Figura 15**, pero a lo largo de la costa francesa. La potencia eléctrica es mayor lejos de la costa para los dos WECs. Sin embargo, la  $P_E$  de AquaBuoy (**Figura 16a**) es bastante menor: solo llega a 40 kW en comparación con los 100 kW de Pelamis (**Figura 16b**). El factor de carga también es menor cerca de las costas para ambos WECs, y mayor para el AquaBuoy (**Figura 16c**, hasta 20%) que para el Pelamis (**Figura 16d**, hasta 15%). En cuanto a la eficiencia, la del AquaBuoy (**Figura 16e**) es mayor lejos de las costas (hasta ~ 40%), mientras que la del Pelamis (**Figura 16f**) es muy baja (<5%) aunque constante en toda la zona.

## AquaBuoy



## Pelamis



**Figura 16.**  $P_E$ ,  $\varepsilon$  y Eficiencia del AquaBuoy (arriba) y el Pelamis (abajo) en la costa francesa en el futuro cercano (2026-2045).

## 4. Discusión

Para luchar contra el cambio climático, es necesario desarrollar energías renovables que permitan reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Entre ellas, las energías marinas tienen un gran potencial ya que más del 70% de la superficie de la Tierra se encuentra cubierta por océanos. Se espera que la energía del oleaje se pueda explotar comercialmente de forma masiva en las próximas décadas gracias a los avances tecnológicos que se están produciendo con el objetivo de obtener WECs eficientes y seguros en el medio marino (Aderinto and Li, 2019 ; Ahamed et al., 2020). Por eso, en este TFM se caracterizó a través de diferentes análisis la energía undimotriz en el Golfo de Vizcaya durante el futuro cercano. El primer paso fue caracterizar esta energía durante el periodo histórico. La **Figura 5** muestra que el WP es mayor cuanto más mar a dentro del Golfo de Vizcaya. A primera vista, Galicia y Britania parecen zonas de interés para instalar WECs porque el WP en estas áreas es más alto que en otras zonas, incluso cerca de la costa, lo cual es un aspecto relevante ya que una menor distancia a costa y profundidad suponen un abaratamiento de la producción.

Como se ve en la **Figura 6**, que representa el  $\Delta$ WP para los futuros cercano y lejano frente al periodo histórico, el cambio climático va a influir de manera negativa sobre la potencia undimotriz porque  $\Delta$ WP tiene valores negativos. Por tanto, es importante señalar que la explotación de la energía undimotriz permite luchar contra el cambio climático, pero se ve a su vez impactada por éste. Además, se caracterizó el recurso estacionalmente. Al estudiar los valores medios de WP para cada estación (**Figura 7**) se ve que el WP varía mucho entre las distintas estaciones durante el periodo histórico siendo mayor en invierno y menor en verano. Este fenómeno se debe al hecho de que los vientos soplan más fuerte en invierno en el hemisferio norte en latitudes medias, lo que provoca olas más energéticas. Este patrón estacional explica que, a la hora de clasificar el recurso undimotriz, los índices que consideran la estabilidad del recurso durante el futuro cercano ( $C_v$  y  $M_v$ ) sean en general bajos (**Figura 11**). Además, se ve que las reducciones de WP (**Figura 8** y **Figura 9**) para el futuro serán más fuertes en primavera, otoño y verano y algo menores durante el invierno. Este patrón de cambio estacional en el recurso favorece que de cara al futuro la variabilidad aún sea mayor. Una manera de paliar este problema de estabilidad del recurso es combinar varias fuentes de energía en un mismo sitio (Oliveira-Pinto et al., 2020). Por ejemplo, la energía solar también varía mucho a lo largo del año, pero al revés que la undimotriz, es decir, es mayor en verano y menor en invierno. Entonces, la instalación de WECs combinados con paneles fotovoltaicos permitiría

reducir la variabilidad del recurso energético: en verano la abundante energía solar compensaría la débil energía undimotriz, y al revés en invierno.

Además de los parámetros de estabilidad ( $C_v$  y  $M_v$ ) ya comentados, se clasificó el recurso undimotriz futuro atendiendo a otros parámetros. En relación a la riqueza del mismo, los valores de WP normalizados que se ven en la **Figura 10** son bastante modestos en el Golfo de Vizcaya. Sin embargo, los valores de operatividad (DWNT) normalizados son muy altos en toda la zona ( $\sim 1$ ), lo que significa que la altura significativa de las olas está entre 1 m y 8 m durante al menos 90 % del futuro cercano (ver **Tabla 1**). La **Figura 12** muestra que el índice Risk sigue la tendencia inversa a la de WP: el riesgo es menor (índice normalizado mayor) cuanto más cerca de las costas del Golfo de Vizcaya. Esto significa que las olas extremas son más frecuentes en mar abierto. Finalmente, se ve en la **Figura 13** que es más sencillo en términos económicos instalar un WEC cerca de las costas francesas porque la profundidad allí es menor, pero este índice de profundidad normalizado solo tiene un peso de 7% en el índice final (ver **Tabla 3**).

Al combinar todos los índices, la **Figura 14** muestra que todo el Golfo de Vizcaya es bastante homogéneo a la hora de clasificar como excelente (valores de 5/7, ver **Tabla 4**) el recurso undimotriz para el futuro próximo. Además, las zonas cercanas a Galicia y Britania se clasifican como sobresaliente (6/7) debido a los altos valores del índice WP y a pesar de los bajos valores del índice Risk (que tiene un peso de 14% en el índice final). Finalmente, la parte del Golfo cerca del País Vasco se clasifica solo como bueno (4/7) debido a altos valores de los índices de profundidad, estabilidad y riesgo (probablemente por la presencia del cañón submarino “Gouf de Capbreton”). Se hizo la misma clasificación para la zona Noroeste de la Península Ibérica durante el futuro cercano en [Ribeiro et al. \(2021\)](#) y, como para el Golfo de Vizcaya, la mayoría de la zona se clasifica como excelente, salvo las aguas cerca de Galicia y Lisboa que se clasifican como sobresaliente. Por lo tanto, a pesar de un WP más bajo en el Golfo de Vizcaya que en otras zonas, como por ejemplo el oeste de la Península Ibérica, se obtienen valores altos en la clasificación del recurso undimotriz debido a valores altos del índice Risk y/o el DWNT que compensan un menor WP.

Pero como no toda la energía undimotriz puede transformarse en electricidad, se analizó la potencia eléctrica ( $P_E$ ), el factor de carga ( $\epsilon$ ) y la eficiencia de dos WECs en las costas del Golfo de Vizcaya. El factor de carga (ver **Fórmula 7**) nos indica lo que produce un WEC respecto al máximo que podría producir ( $P_{MAX}$ ) y la eficiencia (ver **Fórmula 8**) representa la potencia eléctrica generada por unidad de longitud del aparato. Este análisis se hizo considerando únicamente dos WECs de entre los múltiples prototipos que existen porque Pelamis y

AquaBuoy se pueden instalar a una mayor profundidad, lo que se adecúa mejor a la resolución espacial de los datos que disponemos. En las costas españolas (ver **Figura 15**), la  $P_E$  del Pelamis (**Figura 15b**) es bastante mayor que la del AquaBuoy (**Figura 15a**). Este hecho se debe principalmente a que, por su diseño, un Pelamis puede producir mayor potencia. Así los valores de la matriz de potencia de Pelamis son más altos que los del AquaBuoy. En efecto, se ve en la **Tabla 5** que la  $P_{MAX}$  del Pelamis es 3 veces mayor que la del AquaBuoy. En promedio anual, un Pelamis podría generar una potencia eléctrica de hasta 150 kW en Galicia y 100 kW en la plataforma continental francesa. Sin embargo, el factor de carga del AquaBuoy (**Figura 15c**) es mayor que el de Pelamis (**Figura 15d**). Por lo tanto, AquaBuoy se adecúa mejor a la potencia del oleaje existente en esta zona. Además, la eficiencia del AquaBuoy (**Figura 15e**) es también mucho mayor que la del Pelamis (**Figura 15f**) porque su longitud es de solo 6 m (**Tabla 5**), frente a los 150 m del Pelamis. En las costas francesas (**Figura 16**) se da el mismo patrón, pero con valores siempre un poco más bajos (para todos los índices y WECs) que en las costas españolas. Los mismos parámetros que los estudiados en este TFM se analizaron cerca de las costas gallegas para el periodo (2014-2021) en [Arguilé-Pérez et al. \(2022\)](#), para 4 WECs, entre los que se encuentran AquaBuoy y Pelamis. Este trabajo describe un patrón similar al aquí descrito, es decir, Pelamis puede generar más energía pero AquaBuoy tiene un factor de carga y una eficiencia mayores. En este trabajo se propone una estrategia que también podría ser útil para el Golfo de Vizcaya que es la de instalar varios AquaBuoy para alcanzar la  $P_E$  del Pelamis. Al final, cada WEC tiene sus ventajas y desventajas y a la hora de instalar uno en el mar se debe tener en cuenta el estado del oleaje en la ubicación elegida, la profundidad a la que se puede instalar el aparato, y también factores ambientales y humanos.

## 5. Conclusiones

El objetivo de este TFM ha sido analizar el recurso de energía undimotriz en el Golfo de Vizcaya. Se ha estudiado la potencia undimotriz para un periodo histórico (1979-2005) y dos periodos futuros bajo el escenario RCP8.5: cercano (2026-2045) y lejano (2081-2099). Este análisis se hizo utilizando datos provenientes de simulaciones elaboradas con el modelo SWAN. Se ha estudiado la variabilidad estacional de la potencia undimotriz para los 3 periodos. Luego, se ha clasificado el recurso para el futuro cercano. Finalmente, se ha estudiado la potencia eléctrica que generarán dos WECs durante este mismo periodo. Las conclusiones a las que se ha llegado son las siguientes:

- En términos anuales, la potencia undimotriz es mayor hacia mar adentro. En el futuro se espera que el cambio climático tenga un impacto negativo sobre la potencia undimotriz, porque se ha obtenido una disminución del recurso en el futuro. Al analizar el recurso estacionalmente se observa que la potencia es mucho mayor en invierno, bastante baja en verano, e intermedia en primavera y otoño. Esta variabilidad no bajará para los periodos futuros, puesto que las simulaciones proyectan que el recurso disminuirá mucho menos en invierno que durante las otras estaciones.
- El recurso undimotriz futuro se clasifica como excelente (5/7) en la mayor parte del Golfo de Vizcaya, y como sobresaliente (6/7) en extensas zonas cerca de Galicia y Britania. Solo en las aguas cerca del País Vasco se clasifica como bueno (4/7). Así, el Golfo de Vizcaya parece ser una zona interesante a tener en cuenta a la hora de instalar WECs.
- Se ha calculado la potencia eléctrica que podrían generar dos WECs, AquaBuoy y Pelamis, cerca de la costa española y francesa durante el futuro cercano. En ambas zonas, Pelamis puede producir más potencia eléctrica en término medio. Sin embargo, el factor de carga de un AquaBuoy es mayor, es decir, sus características se ajustan mejor al clima marítimo de la zona de estudio. Además, AquaBuoy también presenta una mayor eficiencia debido sobre todo a sus dimensiones más reducidas (6 m) en comparación con Pelamis (150 m).

La clasificación que se hizo en este artículo se puede usar en cualquier zona del mundo para conocer las zonas más adecuadas para la instalación de WECs. Además, es importante destacar que existen varios tipos de WECs que usan diferentes tecnologías para aprovechar la energía del oleaje. Así, todos estos aparatos tienen características bastante distintas (potencia máxima, geometría, profundidad a la que se puede instalar, etc.) que también se deben tener en cuenta, dependiendo del entorno en el que se quiere instalar. El futuro de la energía undimotriz

dependerá principalmente de los avances tecnológicos que experimenten los WECs. Esta energía renovable por sí sola no será suficiente para satisfacer toda la demanda energética de España y/o Francia, pero se puede combinar con otras EMR (eólica y fotovoltaica) para aumentar la potencia total y disminuir la variabilidad del recurso.

## Bibliografía

Aderinto T. and Li H. (2019). Review on power performance and efficiency of wave energy converters. *Energies*, 12 (22), 4329.

<https://doi.org/10.3390/en12224329>

Ahamed R., McKee K. and Howard I. (2020). Advancements of wave energy converters based on power take off (PTO) systems: A review. *Ocean Engineering*, 204, 107248.

<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107248>

Arguilé-Pérez B., Ribeiro A.S., Costoya X., deCastro M., Carracedo P., Dias J.M., Rusu L. and Gómez-Gesteira M. (2022). Harnessing of Different WECs to Harvest Wave Energy along the Galician Coast (NW Spain). *J. Mar. Sci. Eng.* 2022, 10, 719.

<https://doi.org/10.3390/jmse10060719>

Astariz S. and Iglesias G. (2015). The economics of wave energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 397-408.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.061>

Casas-Prat M. and Sierra J. P. (2013). Projected future wave climate in the NW Mediterranean Sea. *Journal Of Geophysical Research: Oceans*. Vol. 118, 3548–3568.

<https://doi.org/10.1002/jgrc.20233>

EESI (2010). Offshore Wind Energy.

[https://www.eesi.org/files/offshore\\_wind\\_101310.pdf](https://www.eesi.org/files/offshore_wind_101310.pdf)

ETIPOCEAN (2020). Strategic Research and Innovation Agenda for Ocean Energy. Brussels, Belgium.

<https://www.oceanenergy-europe.eu/wp-content/uploads/2020/05/ETIP-Ocean-SRIA.pdf>

Hayward J. and Osman P. (2011). The potential of wave energy.

[https://www.researchgate.net/profile/Jennifer-Hayward-3/publication/265179985\\_The\\_potential\\_of\\_wave\\_energy/links/562eaae308ae518e34838303/The-potential-of-wave-energy.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Jennifer-Hayward-3/publication/265179985_The_potential_of_wave_energy/links/562eaae308ae518e34838303/The-potential-of-wave-energy.pdf)

Hemer M., Trenham C., Durrant T. and Greenslade D. (2015). CAWCR Global wind-wave 21st century climate projections. v2. CSIRO. Service Collection.

<https://doi.org/10.4225/08/55C991CC3F0E8>.

Hennemuth T.I., Jacob D., Keup-Thiel E., et al. (2017). Guidance for EURO-CORDEX climate projections data use.

<https://www.euro-cordex.net/imperia/md/content/csc/cordex/euro-cordex-guidelines-version1.0-2017.08.pdf>

IRENA (2021). Offshore Renewables: An Action Agenda for Deployment.

[https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jul/IRENA\\_G20\\_Offshore\\_renewables\\_2021.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jul/IRENA_G20_Offshore_renewables_2021.pdf)

IPCC (2007). Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Synthesis Report.

<https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/sres-en.pdf>

IPCC (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

[https://ar5-syr.ipcc.ch/ipcc/ipcc/resources/pdf/IPCC\\_SynthesisReport.pdf](https://ar5-syr.ipcc.ch/ipcc/ipcc/resources/pdf/IPCC_SynthesisReport.pdf)

IPCC (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press (Cambridge, UK) and New York (NY, USA).

[https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_Chapter04.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter04.pdf)

Kamranzad B. and Hadadpour S. (2020). A multi-criteria approach for selection of wave energy converter/location. *Energy*, 204, 117924.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117924>

Lemos G., Semedo A., Dobrynin M., Behrens A., Staneva J., Bidlot J-R., Miranda P.M.A. (2019). Mid-twenty-first century global wave climate projections: Results from a dynamic CMIP5 based ensemble, *Global and Planetary Change*, Volume 172, 2019, Pages 69-87.

<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.09.011>.

Lira-Loarca A., Ferrari F., Mazzino A. & Besio G. (2021). Future wind and wave energy resources and exploitability in the Mediterranean Sea by 2100. *Applied Energy*, 302, 117492.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117492>

Mørk G., Barstow S., Kabuth A. and Teresa Pontes M. (2010). Assessing the Global Wave Energy Potential. *Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering: Volume 3.

<https://doi.org/10.1115/OMAE2010-20473>

Oliveira-Pinto S., Rosa-Santos P. and 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.

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113299>

Reeve D.E., Chen Y., Pan S., Magar V., Simmonds D.J., Zacharioudaki A. (2011). An investigation of the impacts of climate change on wave energy generation: The Wave Hub, Cornwall, UK. *Renewable Energy*, Volume 36, Issue 9, 2011, Pages 2404-2413.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.02.020>

Reguero B.G., Losada I.J., Méndez F.J. (2019). A recent increase in global wave power as a consequence of oceanic warming. *Nature Communications*.

<https://doi.org/10.1038/s41467-018-08066-0>

Ribeiro A.S., deCastro M., Costoya X., Rusu L., Dias J.M., Gomez-Gesteira M. (2021). A Delphi method to classify wave energy resource for the 21st century: Application to the NW Iberian Peninsula. *Energy* 235, 121396.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121396>

Rusu L. (2019). Evaluation of the near future wave energy resources in the Black Sea under two climate scenarios. *Renewable Energy*, Volume 142, Pages 137-146.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.092>.

Sierra J.P., Casas-Prat M., Campins E. (2017). Impact of climate change on wave energy resource: The case of Menorca (Spain), *Renewable Energy*, Volume 101, Pages 275-285.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.060>.

Silva D., Rusu E., and Soares C.G. (2013). Evaluation of various technologies for wave energy conversion in the Portuguese nearshore. *Energies*, 6(3), 1344-1364.  
<https://doi.org/10.3390/en6031344>

United Nations (2021). COP26 - Together for our planet.  
<https://www.un.org/en/climatechange/cop26>

WindEurope (2020). Offshore Wind in Europe - Key trends and statistics 2019.  
<https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Offshore-Statistics-2019.pdf>

Zabihian A. and S.Fung A. (2011). Review of marine renewable energies: Case study of Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (5), 2461-2474.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.006>