



Universitat
de les Illes Balears

TRABAJO DE FIN DE GRADO

ESTUDIO DEL OLEAJE PROMEDIO EN LA CUENCA MEDITERRÁNEA DESDE 1950 A 2020

Adrián Delgado Martínez

Grado de Física

Facultad de Ciencias

Año Académico 2022-23

ESTUDIO DEL OLEAJE PROMEDIO EN LA CUENCA MEDITERRÁNEA DESDE 1950 A 2020

Adrián Delgado Martínez

Trabajo de Fin de Grado

Facultad de Ciencias

Universidad de las Illes Balears

Año Académico 2022-23

Palabras clave del trabajo:

Altura de ola significativa, NAO, periodo de ola

Nombre Tutor/Tutora del Trabajo: Angel Miguel Amores Maimó

Se autoriza la Universidad a incluir este trabajo en el Repositorio Institucional para su consulta en acceso abierto y difusión en línea, con fines exclusivamente académicos y de investigación.

Resumen

Castellano.

Este Trabajo de Fin de Grado se enfoca en el estudio de las variables relacionadas con el oleaje en la cuenca del Mediterráneo durante el período de 71 años comprendido entre 1950 y 2020. Se analizan parámetros del oleaje mediterráneo, como la altura y el periodo de las olas en términos espaciales y temporales. Los datos utilizados en este estudio provienen del hindcast Coastal Extremes in the Mediterranean Sea (CoExMed), con alta resolución espacial.

Centraremos nuestro estudio en analizar la evolución climática del oleaje en el Mar Mediterráneo a lo largo de las últimas siete décadas. Durante ese período se examinan las diferencias de los parámetros de ola entre dos estaciones. El objetivo principal de este análisis es poder reconocer cambios significativos en estos parámetros a lo largo de las décadas y poder determinar una posible relación con el calentamiento global.

Los resultados del estudio revelan que no hay una tendencia clara en el aumento de la altura de ola a lo largo de los años, lo que sugiere que el cambio climático no tiene impacto en las olas mediterráneas. Se observa también una mayor altura de ola en invierno que en verano, debido principalmente a la presencia de tormentas invernales y a la escasez de tormentas estivales.

También se examina la relación entre el índice de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) y las alturas de las olas. En invierno, se encuentra una correlación positiva y un alto número de años con signos coincidentes entre la NAO y la altura de ola media anual, lo que sugiere una influencia de la NAO en las condiciones del oleaje en el Mediterráneo. Sin embargo, en verano, la correlación es negativa y el número de años coincidentes disminuye en gran medida.

En cuanto a la distribución espacial de las alturas de las olas, se observa que son más altas en áreas profundas del Mediterráneo.

Català.

Aquest Treball de Fi de Grau s'enfoca en l'estudi de les variables relacionades amb l'onatge en la conca del Mediterrani durant el període de 71 anys comprès entre 1950 i 2020. S'analitzen paràmetres de l'onatge mediterrani, com l'altura i el període de les ones en termes espacials i temporals. Les dades utilitzades en aquest estudi provenen del *hindcast Coastal Extremes in the Mediterranean Sea (CoExMed), amb alta resolució espacial.

Centrarem el nostre estudi a analitzar l'evolució climàtica de l'onatge en la Mar Mediterrània al llarg de les últimes set dècades. Durant aquest període s'examinen les diferències dels paràmetres d'ona entre dues estacions. L'objectiu principal d'aquesta anàlisi és poder reconèixer canvis significatius en aquests paràmetres al llarg de les dècades i poder determinar una possible relació amb l'escalfament global.

Els resultats de l'estudi revelen que no hi ha una tendència clara en l'augment de l'altura d'ona al llarg dels anys, la qual cosa suggereix que el canvi climàtic no té impacte en les ones mediterrànies. S'observa també una major altura d'ona a l'hivern que a l'estiu, degut principalment a la presència de tempestes hivernals i a l'escassetat de tempestes estivals.

També s'examina la relació entre l'índex de l'Oscil·lació de l'Atlàntic Nord (NAO) i les altures de les ones. A l'hivern, es troba una correlació positiva i un alt nombre d'anys amb signes coincidents entre la NAO i l'altura d'ona mitjana anual, la qual cosa suggereix una influència de la NAO en les condicions de l'onatge al Mediterrani. No obstant això, a l'estiu, la correlació és negativa i el nombre d'anys coincidents disminueix en gran manera.

Quant a la distribució espacial de les altures de les ones, s'observa que són més altes en àrees profundes del Mediterrani.

English.

This Bachelor's Thesis focuses on the study of variables related to wave activity in the Mediterranean basin during the 71-year period from 1950 to 2020. Parameters of Mediterranean waves, such as wave height and period, are analyzed in both spatial and temporal terms. The data used in this study are sourced from the Coastal Extremes in the Mediterranean Sea (CoExMed) hindcast with high spatial resolution.

Our study primarily aims to analyze the climatic evolution of wave activity in the Mediterranean Sea over the past seven decades. During this period, differences in wave parameters between two stations are examined. The main objective of this analysis is to recognize significant changes in these parameters over the decades and determine a potential relationship with global warming.

The study results reveal that there is no clear trend in the increase of wave height over the years, suggesting that climate change does not have an impact on Mediterranean waves. Additionally, higher wave heights are observed in winter compared to summer, mainly due to the presence of winter storms and the scarcity of summer storms.

The relationship between the North Atlantic Oscillation (NAO) index and wave heights is also examined. In winter, a positive correlation and a high number of years with matching signs between NAO and annual average wave height are found, suggesting NAO's influence on wave conditions in the Mediterranean. However, in summer, the correlation is negative, with a significant decrease in the number of matching years.

Regarding the spatial distribution of wave heights, it is observed that they are higher in deep areas of the Mediterranean.

Índice

1. Introducción	8
2. Datos utilizados	9
3. Resultados	9
3.1. Series temporales	10
3.1.1. Media Hs	10
3.1.2. Percentil 90 de Hs	11
3.1.3. Alturas máximas de Hs	12
3.1.4. Media periodo de ola	14
3.2. Mapa de máximos Hs en invierno	14
3.3. NAO	15
4. Espacial	17
4.1. Altura de ola media	17
4.2. Percentil 90 de Hs	19
4.3. Máximas Hs	19
4.4. Media periodo de ola	21
5. Conclusiones del estudio	21

1. Introducción

La investigación se lleva a cabo en el Mar Mediterráneo, mar con una extensión de alrededor de 2.5 millones de km^2 que en latitud se extiende desde 30°N hasta 46°N y en longitud de 6°O hasta 36°E , ocupa solo un 0.5% de la superficie de la Tierra. Geográficamente, se trata de un mar interior, intercontinental rodeado de Europa, África y Asia y casi completamente cerrado, conectándose con el océano Atlántico a través del Estrecho de Gibraltar. Esta peculiar configuración le otorga un clima distintivo y una circulación marina única [1].

De manera ocasional, eventos extremos como lluvias torrenciales al oeste del Mediterráneo [2], incrementos repentinos del nivel del mar en áreas costeras debido a efectos del viento o cambios en la presión atmosférica (provocando por ejemplo la rissaga de 2006 en Ciutadella) [3] pueden ocurrir. Esta combinación de características geográficas y climáticas hace que el Mediterráneo sea un entorno marino excepcionalmente diverso [1].

En este trabajo de fin de grado nos centramos en el estudio de las diferentes componentes que definen el oleaje, estas son: la altura significativa de ola y el periodo pico. Es importante destacar que el oleaje es una variable más compleja de caracterizar en comparación con parámetros como la temperatura o la presión atmosférica. Esto se debe a que el oleaje depende de múltiples factores como el periodo, la altura y la dirección. Además, en un mismo punto del mar, pueden coexistir varios parámetros del oleaje que interactúan entre sí, complicando así su estudio y comprensión.

Para poder comprender el oleaje, se utilizan los espectros de oleaje. Estos espectros descomponen el oleaje en diferentes componentes de frecuencia, que proporcionan una muestra detallada de la energía del oleaje. Sin embargo, los espectros de oleaje pueden resultar poco prácticos debido a su complejidad [4].

Por lo tanto, nos centraremos en tres variables más fáciles de manejar que ofrecen de igual forma una buena descripción del oleaje:

- **Altura significativa de ola:** la altura significativa de ola se define como la altura media del tercio de olas más altas registradas en un período de tiempo determinado. Esta medida nos proporciona una estimación representativa de la altura del oleaje.
- **Periodo pico:** el periodo pico de las olas es un parámetro que mide el tiempo que transcurre entre dos crestas consecutivas de las olas más grandes. Este periodo está relacionado con la máxima energía presente en el espectro de frecuencias del oleaje. A mayor periodo pico, tendremos olas más largas y espaciadas.
- **Dirección de pico:** la dirección de pico indica la dirección desde la cual provienen las olas con más altura. A diferencia de meteorología, donde la dirección del viento se entiende como hacia donde va, en oceanografía se comprende como dirección al rumbo de donde provienen las olas.

En la siguiente sección se explicarán los datos usados en el estudio. Después se dividirá la sección 3 en dos subsecciones en las que analizaremos por separado las series temporales (sección 3.1) y mapas espaciales (sección 3.2) de los parámetros: media de H_s , media del percentil 90 de H_s , alturas máximas de H_s y media del periodo de ola en ese orden de invierno y verano. Seguidamente, en la sección 3.3 se estudiará la posible relación entre la altura significativa de ola media abual con el factor NAO. Finalmente, en la última sección, se presentan las conclusiones más importantes del trabajo.

2. Datos utilizados

Para ayudarnos a estudiar la evolución de los parámetros del oleaje mediterráneo de las últimas siete décadas se usa un nuevo reanálisis con una mayor precisión espacial y temporal, un hindcast llamado CoExMed.

Usaremos una malla computacional compuesta por 379762 nodos con una resolución horizontal de aproximadamente 20 km en áreas de océano abierto y 200 m en áreas costeras. Se ha usado como batimetría la proporcionada por EMODnet [5], que se ha interpolado sobre la malla desestructurada que usa el modelo. Se emplearon datos del hindcast Coastal Extremes in the Mediterranean Sea (CoExMed), que abarca un periodo de 72 años, desde 1950 hasta 2021 [6].

El hindcast del CoExMed se realiza en el superordenador Finisterrae II del Centro de Supercomputación de Galicia y utiliza un paso de tiempo de 10 minutos, almacenando los datos cada hora. En nuestro estudio se trabajará con datos diarios para acelerar el procesamiento y reducir el almacenamiento necesario.

Del hindcast CoExMed obtenemos datos diarios de altura significativa de ola (H_S) y periodo pico (T_P). Además trabajamos en su malla espacial y temporal, por lo que obtenemos los datos de la longitud, latitud y tiempo.

Por último compararemos la altura significativa de ola media con el índice Oscilación del Atlántico Norte (NAO). Los datos del factor NAO han sido obtenidos de la agencia americana National Oceanic and Atmospheric Administration [7].

3. Resultados

En esta sección mostraremos y analizaremos los resultados obtenidos de nuestro estudio sobre el oleaje medio en la cuenca mediterránea de los 71 años considerados. Dividiremos nuestro estudio en dos subsecciones; la primera enfocándonos en la evolución temporal de los parámetros y en la segunda subsección nos centraremos en el análisis espacial.

3.1. Series temporales

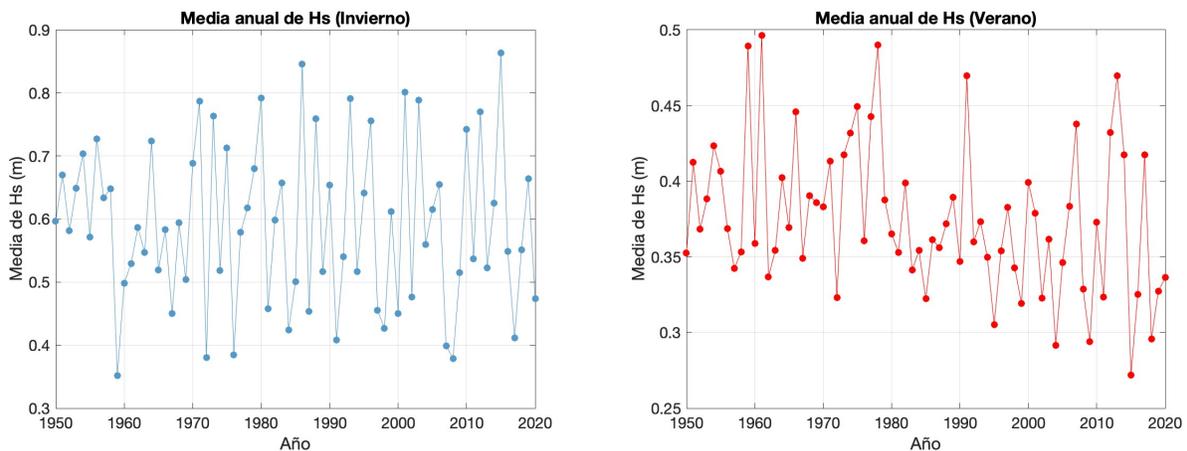
En primer lugar, abordaremos el análisis del valor medio del oleaje a lo largo de los 71 años, en dos estaciones: invierno y verano. Esta elección se basa en la reducción de la carga computacional, seleccionando solo tres meses en cada caso, y también para poder destacar las diferencias entre ambas estaciones. En el caso del invierno, se tomarán en cuenta los datos de enero, febrero y marzo, aunque la estación oficial abarque desde el 22 de diciembre hasta el 20 de marzo. De manera similar, para el verano, consideraremos los datos de julio, agosto y septiembre, a pesar de que la estación se extienda desde el 21 de junio hasta el 23 de septiembre. En cada estación, podremos examinar, entre otras cosas, si el factor humano ejerce alguna influencia en el oleaje y si con estos datos podemos identificar grandes tormentas.

Por último, trataremos de identificar una posible correlación entre el factor ambiental NAO y la altura significativa de las olas. En cada estación, analizaremos diferentes aspectos del oleaje, incluyendo la media de la altura significativa de las olas, el percentil 90 de las alturas más elevadas, las alturas máximas de las olas registradas en cada año y la media en el periodo de repetición de las olas.

Como el hindcast obtiene datos de una parte más allá del estrecho de Gibraltar, una parte del Atlántico, decidimos quitarla y centrarnos solamente en la zona mediterránea.

3.1.1. Media Hs

Como ya hemos comentado usaremos los datos del hindcast para analizar la evolución de la media de la altura de ola significativa con el tiempo. Esperamos de la estación invernal un valor más elevado de las alturas de ola por el mayor número de tormentas las cuales generan altas olas. Para el verano, por contra, esperamos una altura de ola inferior que en invierno debido a las escasas tormentas veraniegas. Los gráficos pertenecientes al estudio invernal serán de color azul y los de color rojo serán de verano.



(a) Media de la altura significativa de ola de los meses de invierno a lo largo de los 71 años del estudio. (b) Media de la altura significativa de ola para verano a lo largo de los 71 años del estudio.

Figura 1: Media anual de la altura de ola significativa para las dos estaciones consideradas.

En la figura 1, que representa la altura significativa de ola media en la cuenca del Mediterráneo durante los últimos 71 años, obtenemos una media de altura de ola significativa de 0.59 m. En verano esta altura de ola media desciende a 0.40 m afirmando la suposición inicial sobre que en invierno obtendríamos alturas de ola más altas.

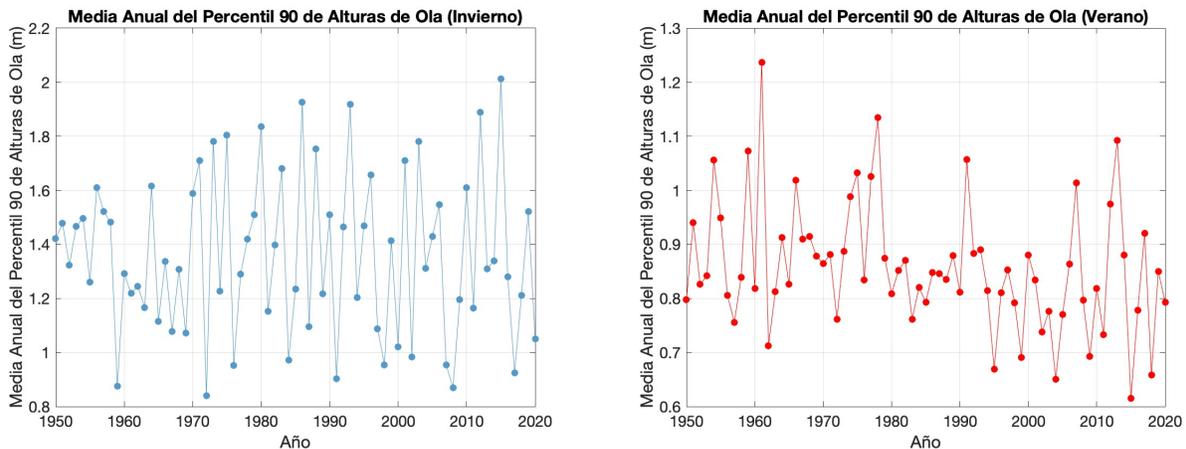
Es interesante notar los valores máximos y mínimos en estas series de datos. Primero, centrémosnos en la serie de invierno (figura 1a), destacando dos picos de 0.85 y 0.86 m registrados en los años 1986 y 2015 respectivamente que podrían haber sido influenciados por tormentas notables. Además, resalta un mínimo pronunciado en el año 1959, con una altura de ola significativa de 0.35 m.

Comparando estos resultados con los obtenidos en la temporada estival (Figura 1b), se confirma que las alturas medias de las olas son, como se esperaba, más bajas. La altura media máxima registrada en invierno fue de 0.86 m en el año 2015, mientras que en verano la máxima media fue de 0.50 m en 1961. En cuanto a mínimos, en verano obtenemos en el año 2015 una altura media mínima de 0.27 m.

En la figura 1 se observa a simple vista que no existe una tendencia clara al aumento/decrecimiento de la altura de las olas a lo largo de los años. Haciendo un ajuste lineal, obtenemos una tendencia ligeramente negativa con valor de -0.2 y -0.7 mm/año para invierno y verano respectivamente. Esto sugiere que el cambio climático generado por el calentamiento global no tiene un impacto inmediato y evidente en la altura de las olas mediterráneas.

3.1.2. Percentil 90 de Hs

Ahora veremos la serie temporal de la media del percentil 90 de altura de ola significativa para las dos estaciones consideradas. Esto son el 10% de las alturas de ola significativa más altas.



(a) Media del percentil 90 de las alturas más altas de ola en invierno para los 71 años del estudio. (b) Media del percentil 90 de las alturas más altas de ola en verano para los 71 años del estudio.

Figura 2: Media del percentil 90 de las alturas de ola más altas en invierno y verano.

En la figura 2 que representa el percentil 90 de las alturas de ola significativas más altas, obtenemos para invierno una altura media de 1.4 m que vuelve a contrastar con el valor medio para verano, siendo este 0.76 m.

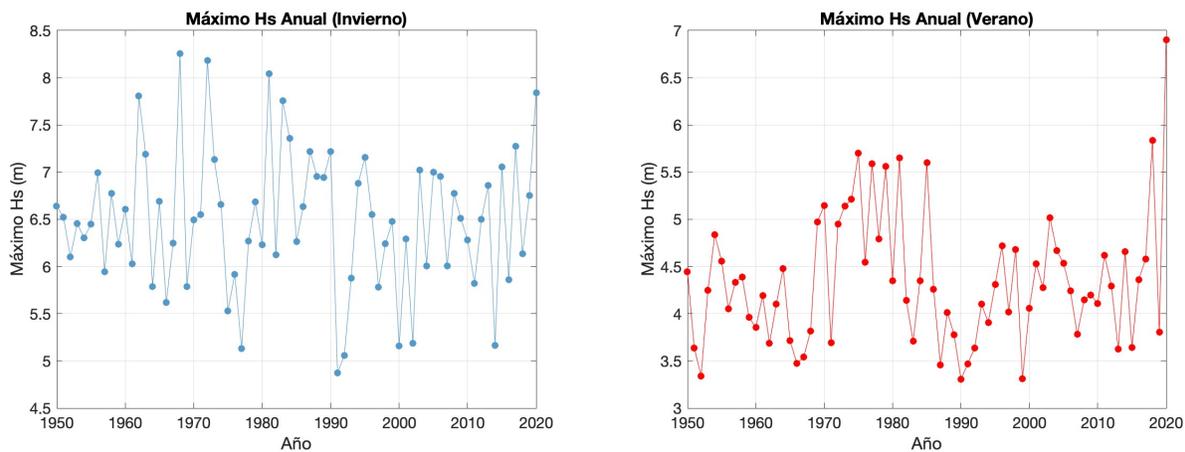
Centrándonos primero en invierno (figura 2a) destacamos un pico notable que coincide con la media de altura significativa (figura 1a) en el año 2015 con una altura de ola media del percentil 90 de 2.0 m. En cuanto al mínimo, obtenemos uno en 1972 con valor de 0.84 m.

Para la estación de verano (figura 2b) se destaca un máximo de 1.2 m en el año 1961. Por otro lado, se registra un mínimo de 0.61 m en el año 2015 que curiosamente coincide con el año en el que se registró en invierno la altura media máxima del percentil 90. Comparando estos resultados con los obtenidos en invierno, vemos como efectivamente en la estación invernal volvemos a obtener unas alturas de ola mucho mayores que en verano debido principalmente a la cantidad de tormentas registradas.

En la figura 2, podemos apreciar que la altura del percentil 90 de las olas más grandes en ambas estaciones no refleja una tendencia ascendente ni descendente significativa a lo largo de los años. Esto lo refleja la regresión lineal con un valor de -2 mm/año para invierno y verano. Esto, una vez más, sugiere que el factor humano puede no estar teniendo impacto en cuanto a la media de las olas más altas de los últimos 71 años en la cuenca mediterránea.

3.1.3. Alturas máximas de Hs

Vamos ahora a estudiar las alturas significativas máximas de ola registradas para cada año de las dos estaciones consideradas de los 71 años del estudio en la cuenca del Mediterráneo.



(a) Alturas máximas de olas para los tres meses de invierno en los 71 años estudiados.

(b) Alturas máximas de olas para los tres meses de verano en los 71 años estudiados.

Figura 3: Alturas máximas de ola para los 71 años del estudio para invierno y para verano.

Comparando el valor medio de las alturas máximas representadas en la figura 3 observamos una gran diferencia entre ambas estaciones. En invierno obtenemos un valor medio de 6.50 m y en verano obtenemos un valor medio de 4.45 m. Una vez más, obtenemos un valor mucho mayor en invierno que en verano.

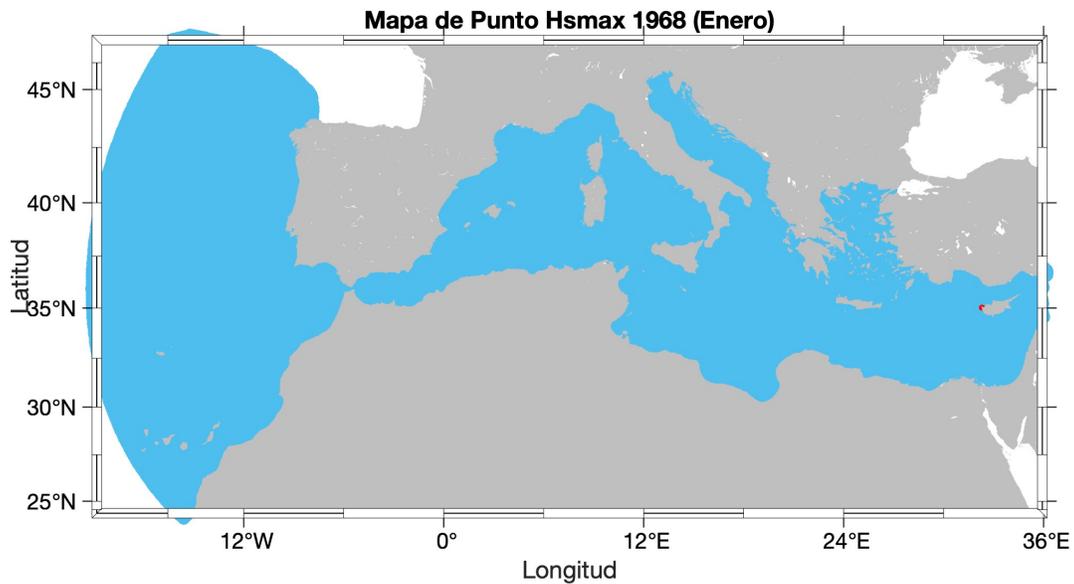


Figura 4: Localización exacta de la altura de ola significativa máxima obtenida en el estudio en enero de 1968 en la costa de Chipre.

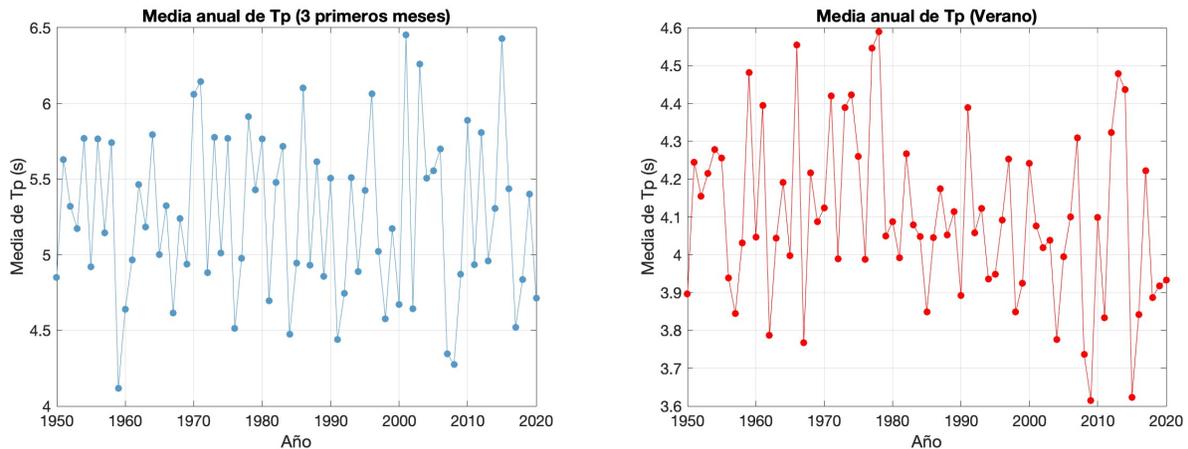
A continuación revisamos los valores máximos y mínimos de cada estación hasta la fecha. En relación al invierno (ver Figura 3a), cabe destacar tres picos de altura en los años 1968, 1972 y 1981, con alturas de ola máximas de 8.3, 8.2 y 8.0 m, respectivamente. Estos tres años son destacables ya que superan la altura significativa máxima registrada en 2020, durante la tormenta Gloria, cuando las olas alcanzaron más de 14 m [8]. La altura significativa de 1968, con sus 8.3 m, destaca como la más elevada en los últimos 71 años en el Mediterráneo. Debido a su relevancia, se ha llevado a cabo una investigación adicional sobre este récord. Se identificó que ocurrió en enero de 1968, en la costa occidental de Chipre, como se muestra en la Figura 4. Se supone una gran tormenta aunque no hay datos ni noticias que lo contrasten. Si comparamos este récord con el gran temporal de la borrasca Gloria, que generó fuertes vientos en enero de 2020, observamos una altura máxima de oleaje de 7.8 m en ese mes. En cuanto a los valores mínimos, se registró el mínimo global en 1991, con una altura significativa máxima de 4.9 m.

En la estación veraniega (figura 3b) se obtiene un máximo de 6.9 m en 2020 y dos mínimos de 3.3 m en 1952 y 1999. Resalta la altura significativa máxima de 2020 ya que ese mismo año, con la tormenta Gloria en enero, se alcanzaron alturas significativas máximas de tan solo 0.8 m más.

Volvemos a observar en la figura 3 en este caso la no relación entre los años y la altura máxima de ola tanto para invierno como para verano. Haciendo la regresión lineal volvemos a obtener un valor muy pequeño y negativo para invierno: -4 mm/año y positivo en verano con valor de 0.9 mm/año. Por lo que en cuanto a altura de ola respecta, podemos sugerir que el cambio climático no parece tener un efecto inmediato y/o evidente en la altura de las alturas de ola, ni en la media de todas las significativas, ni en la media de las más altas ni en las olas más altas de cada año.

3.1.4. Media periodo de ola

Estudiaremos ahora el periodo de ola en los meses de invierno y verano. El periodo que presentamos es el periodo pico de ola, esto es el periodo entre olas consecutivas considerando las olas del tercio más altas.



(a) Media del periodo de ola en invierno a lo largo de los 71 años. (b) Media del periodo de ola en verano a lo largo de los 71 años.

Figura 5: Media anual del periodo de ola para las estaciones de invierno y verano en los 71 años de estudio en la cuenca del Mediterráneo.

Comparando los resultados del periodo de ola de las dos estaciones de la figura 5, notamos que los resultados en invierno son significativamente mayores. La media del periodo de ola anual en invierno es de 5.3 s mientras que en verano es de 4.1 s, más de un segundo de diferencia entre olas significativas entre invierno y verano.

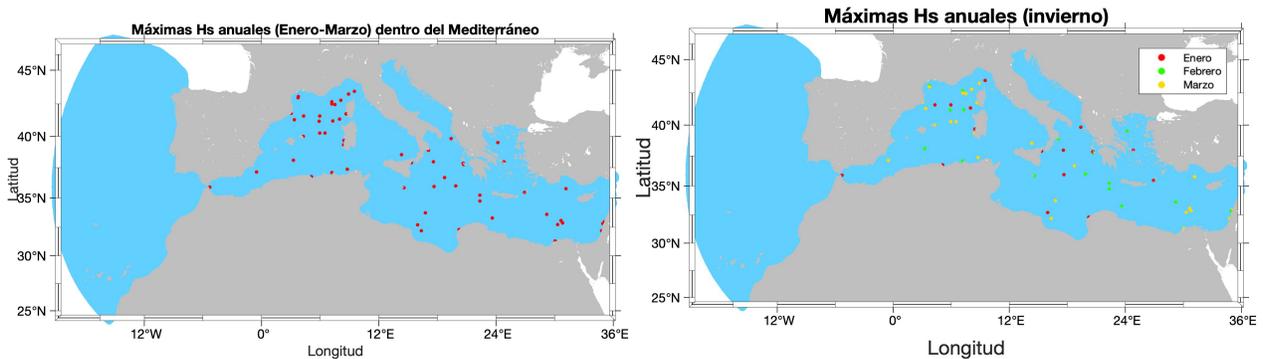
En cuanto a los valores máximos de invierno (figura 5a), destacan dos picos pronunciados en invierno, con valores de 6.5 s y 6.4 s en los años 2001 y 2015, respectivamente. En verano, notamos un máximo de 4.6 s en el año 1978. En cuanto a mínimos, en invierno obtenemos una media mínima en el periodo de ola de 4.1 s en el año 1959 y en verano un mínimo de 3.6 s en el año 2009.

En la figura 5 observamos que no se evidencia un cambio significativo en el de periodo de ola en el oleaje mediterráneo a lo largo de los años, ya sea en invierno o en verano. Los resultados en las regresiones lineales vuelven a mostrar un signo negativo con magnitud muy pequeña: -0.6 y -3 ms/año en invierno y verano respectivamente. Esto sugiere que, al menos en estas estaciones, no parece existir una influencia antropogénica visible entre el periodo de ola y los años en el Mediterráneo.

3.2. Mapa de máximos Hs en invierno

Como ya hemos visto, en invierno obtenemos unas alturas significativas de ola mayores que en verano. Podemos pintar la localización de las alturas de ola máximas en el mapa del Mediterráneo e intentar localizar las ubicaciones con un oleaje más agresivo.

Representamos a continuación los puntos donde se han obtenido los valores máximos de ola.



(a) Mapa de los Hs máximos anuales en el Mediterráneo. (b) Mapa de los máximos de ola anuales en invierno según el mes en el que se produjeron.

Figura 6: Mapa con las localizaciones de las olas máximas anuales en el Mediterráneo y otro distinguiendo por meses.

En la figura 6 se presentan los máximos de ola registrados de los 71 años en la cuenca mediterránea. Añadimos una figura adicional distinguiendo los máximos de ola según el mes en el que se alcanzaron en su año.

De la figura 6a podemos observar una zona áltamente cargada de puntos en la zona que separa Baleares con Córcega y Cerdeña. También notamos más densidad de puntos en las costas de Egipto e Israel y entre las costa italiana, griega y libia.

Del mapa de la figura 6b observamos que obtenemos más alturas significativas de ola máximas en marzo que en enero o febrero. En concreto el 44 % de las alturas significativas máximas ocurren en marzo.

3.3. NAO

A continuación haremos un estudio de la altura de ola significativa media comparada con el factor ambiental NAO. La Oscilación del Atlántico Norte (NAO por sus siglas en inglés) es la diferencia de presión en la superficie del nivel del mar entre el máximo subtropical (las Azores) y la región subpolar (figura 7). Las fases positivas se asocian a alturas y presiones por debajo de lo normal en las latitudes altas del Atlántico Norte y por encima de lo normal en el centro del Atlántico (Europa occidental). Las fases negativas, por su parte, se asocian a alturas y presiones por encima de lo normal en las latitudes altas del Atlántico Norte y por debajo de lo normal en el centro del Atlántico [7].

Las fases positivas fuertes de NAO se asocian a precipitaciones por debajo de lo normal en el sur y centro de Europa. El factor NAO muestra una considerable variabilidad interestacional e interanual, y periodos prolongados de varios meses de sus fases positivas y negativas [7].

Para esta sección restaremos la media de ola de todos los años considerados (la altura de ola media global) para las dos estaciones y poder tener la media de ola total en cero. De esta forma tendremos la media de las olas en cero y veremos la variación anual media de esta y de la NAO al mismo tiempo, ya que tiene su origen en cero por definición [7].

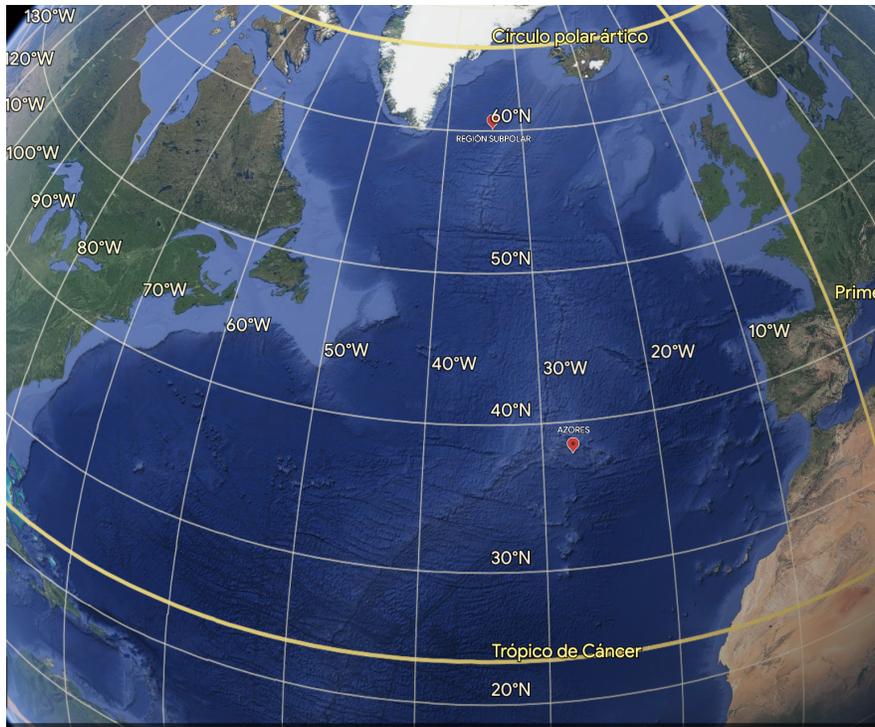


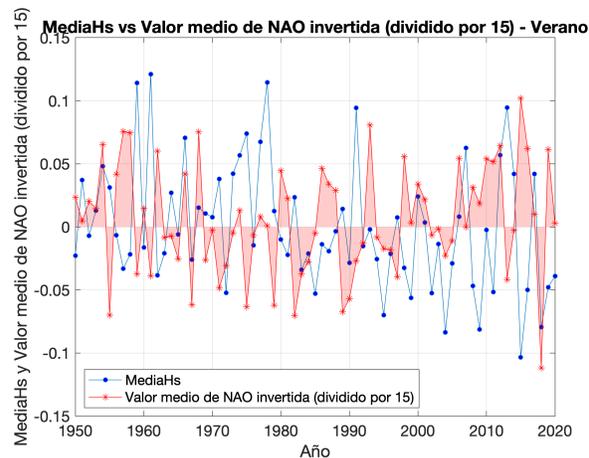
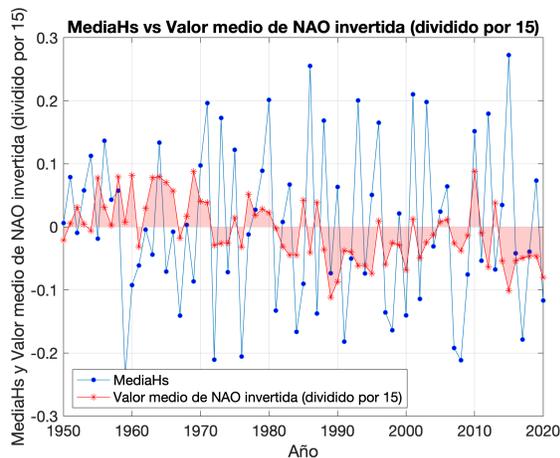
Figura 7: Localización de las islas Azores y la región subpolar [9]

Volveremos a dividir el estudio en las dos estaciones que hemos estudiado hasta ahora: invierno y verano.

Vamos a centrarnos primero en la figura 8a donde se representa la media de la altura de ola significativa de la estación invernal junto con el factor NAO invertido para que coincida el signo y dividido por 15 para poder comparar ambas series.

La relación entre el factor ambiental NAO y las alturas media de ola significativa viene dada por la cantidad de precipitaciones, tormentas y subidas del nivel del mar que vienen representadas en un mayor NAO [7]. Contemplamos como las fases negativas del factor NAO se asocian con medias de altura de ola por encima de la media y que las fases positivas se asocian con medias de altura de ola por debajo de lo normal. En invierno obtenemos una correlación anual de 0.08 que es muy bajo, sin embargo algo más representativo que la correlación lineal puede ser el número de años en los que coinciden el signo de la altura de ola media con NAO. En invierno encontramos 43 coincidencias de los 71 años, esto es una coincidencia en el 61 % de los años del estudio.

Podemos notar a simple vista como en el caso de verano (figura 8b) no hay tanta coincidencia como en la estación de invierno. Esto puede ser debido a la menor presencia de tormentas en todo el Atlántico y Mediterráneo que en el periodo invernal. La correlación lineal y el número de años en los que el signo de la media de H_s y del factor NAO coinciden nos pueden aportar información sobre la relación entre estos dos parámetros. En cuanto a la correlación, obtenemos una correlación de -0.19, una correlación muy baja. En cuanto a coincidencias con el signo, encontramos 32 coincidencias de los 71 años, esto es un 45 %.



(a) Comparativa de la media de altura de ola significativa y el factor ambiental NAO invertido en invierno para los 71 años en la cuenca mediterránea.

(b) Comparativa de la media de altura de ola significativa y el factor ambiental NAO invertido para los 71 años en la cuenca mediterránea.

Figura 8: Se compara la altura media de las olas con el índice NAO invertido en invierno y verano. Se ajustaron las medias anuales restando la media global. El índice NAO se dividió por quince para facilitar la comparación. En el eje de las ordenadas se representa el valor de NAO que es adimensional.

Notamos una ligera diferenciación entre las dos estaciones, en invierno la correlación lineal y el número de años coincidentes en signo es mayor que en verano. De la estación veraniega no podemos sacar una relación clara entre el factor NAO y las alturas medias de ola anuales.

4. Espacial

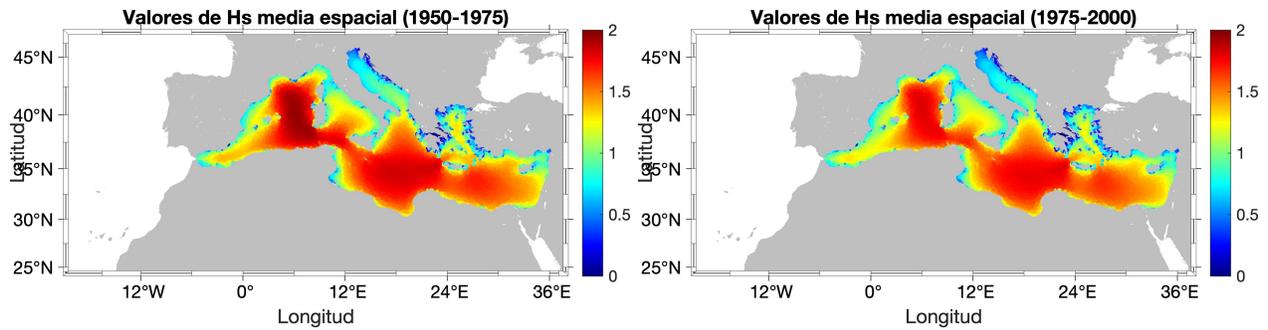
En esta sección pasamos de estudiar la evolución temporal a centrarnos en la parte espacial. En este caso, volvemos a analizar los mismos factores de ola que en la parte temporal pero estudiando la parte espacial de los mismos. Por contra, nos centramos únicamente en la estación invernal ya que ha demostrado ser la más activa como hemos podido observar en las series temporales.

Dado que el hindcast recopila datos que se extienden más allá del estrecho de Gibraltar, incluyendo una porción del Atlántico, hemos optado por eliminar esta área y enfocarnos exclusivamente en la región mediterránea, siguiendo el mismo enfoque que hemos aplicado en las series temporales.

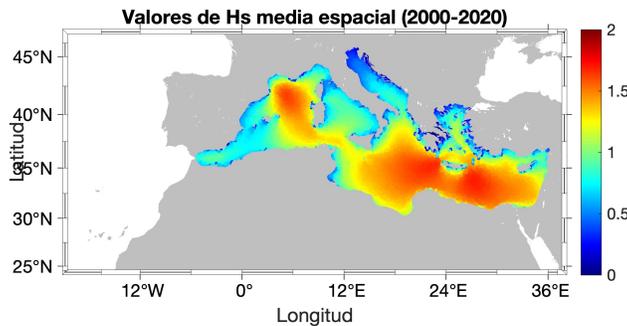
Dividiremos cada subsección en tres etapas de años para rebajar la carga computacional y poder comparar entre los tres periodos. La primera etapa abarcará del 1950 al 1975, la segunda del 1975 al 2000 y la tercera del 2000 al 2020.

4.1. Altura de ola media

Volvemos a empezar con el análisis de la media de la altura significativa de ola, esta vez estudiando su parte espacial.



(a) Media espacial de la altura de ola en el Mediterráneo de los años 1950 al 1975. (b) Media espacial de la altura de ola en el Mediterráneo de los años 1975 al 2000.



(c) Media espacial de la altura de ola en el Mediterráneo de los años 2000 al 2020.

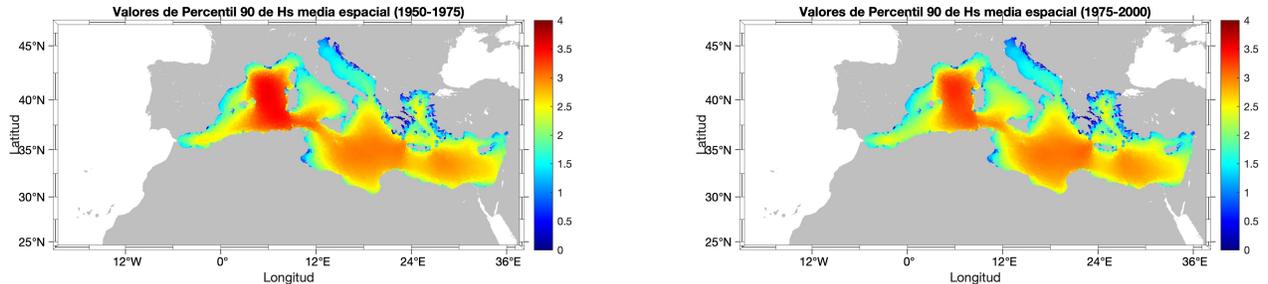
Figura 9: Mapas con la altura de ola media en el área del estudio.

En la figura 9, podemos observar que las alturas significativas de las olas tienden a ser más elevadas en aguas profundas del Mediterráneo y considerablemente más bajas en las zonas costeras. Estas notables disparidades pueden explicarse, al menos en parte, por la influencia del fetch. El fetch es la distancia en la cual el viento puede soplar sobre la superficie del agua y generar olas. En áreas donde el fetch es limitado, como en el Adriático, un mar estrecho y largo, las alturas medias de las olas tienden a ser más bajas en comparación con el resto del Mediterráneo. Esta diferencia puede deberse también a la interacción de las olas con el fondo marino en aguas costeras, donde la profundidad es menor y las olas pueden romper y perder energía, lo que resulta en alturas de ola más reducidas en comparación con las aguas profundas.

Lo único destacable como diferencia entre las tres etapas mostradas en las figuras 9a, 9b y 9c es la disparidad entre las etapas primera (50-75) y segunda (75-00) con la etapa final (00-20). Vemos como en el espacio comprendido entre Baleares y Córcega-Cerdeña, la altura de ola media para la etapa final es menor y no llega a los 2 m, espacio en el que en las otras dos etapas se supera. También vemos una zona al sur de Grecia e Italia con olas significativas ligeramente superiores en la primera y segunda etapa. En general las olas significativas de los años 2000-2020 son más pequeñas que en los 50 años anteriores.

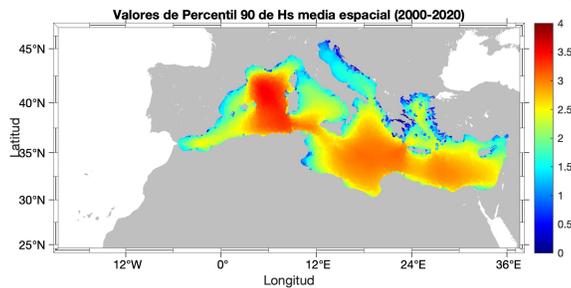
4.2. Percentil 90 de Hs

Ahora veremos los mapas para las tres etapas de la media del percentil 90 de las alturas significativas de ola más altas en todos los puntos del Mediterráneo.



(a) Media espacial de la altura de ola en el Mediterráneo de los años 1950 al 1975.

(b) Media espacial de la altura de ola en el Mediterráneo de los años 1975 al 2000.



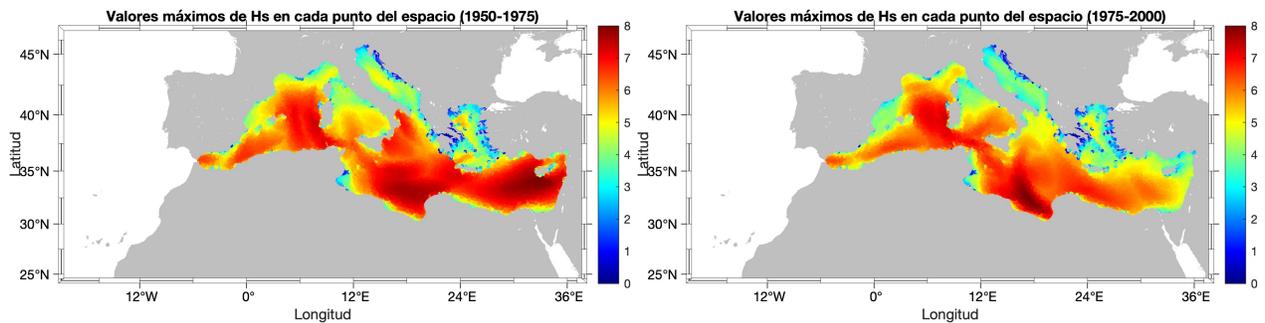
(c) Media espacial de la altura de ola en el Mediterráneo de los años 2000 al 2020.

Figura 10: Mapas con la media del percentil 90 de altura de ola significativa media en el área del estudio.

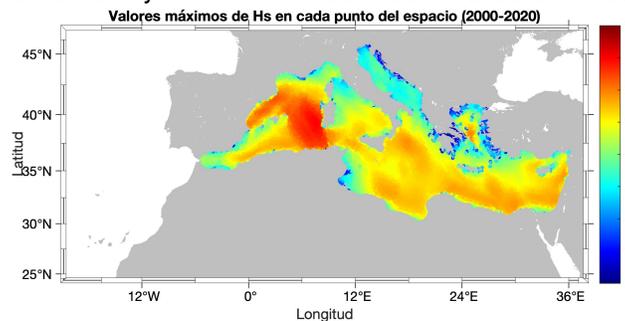
En la figura 10 se observa que los mapas de las tres etapas son prácticamente idénticos. Notamos en los tres que una vez más obtenemos olas más altas en la zona comprendida entre Baleares y Córcega y Cerdeña. También podemos observar como por norma general las olas más elevadas surgen a grandes profundidades del Mediterráneo, superándose en este caso los 3.5 m de ola significativa. En zonas poco profundas como es todo el mar Adriático (cuya profundidad media es de tan solo 44 m y es de unos 900 m [10]) o el mar Egeo, no obtenemos alturas medias del 10% más altas de las olas significativas superiores a 2 m.

4.3. Máximas Hs

Estudiaremos ahora las alturas significativas máximas de ola para cada punto del Mediterráneo obtenidas por el hindcast.



(a) Máxima altura de ola significativa de cada punto del mediterráneo entre los años 1950 y 1975. (b) Máxima altura de ola significativa de cada punto del mediterráneo entre los años 1975 y 2000.



(c) Máxima altura de ola significativa de cada punto del mediterráneo entre los años 2000 y 2020.

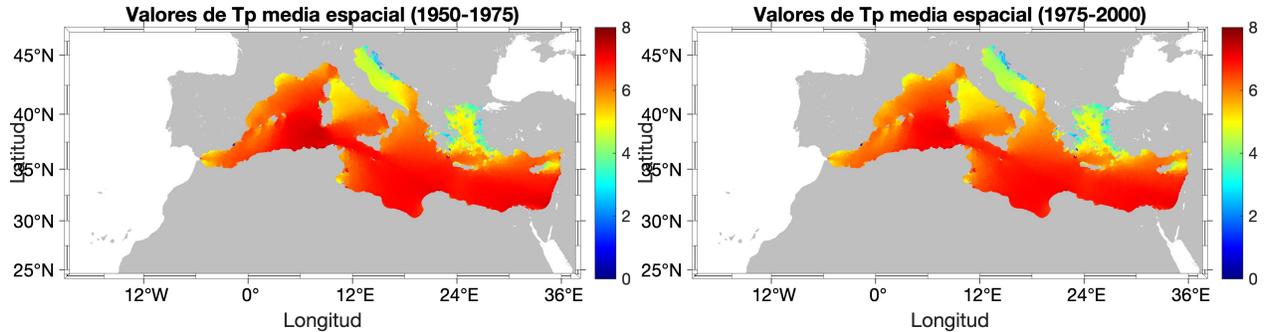
Figura 11: Mapas con la máxima altura de ola significativa en el área del estudio.

Lo primero que nos llama la atención de la figura 11 es donde se localizan los máximos más elevados en las primeras dos etapas (figuras 11a y 11b). Los máximos más grandes de estas primeras dos etapas se encuentran al este del Mediterráneo y al sur de Italia, en la costa de Libia. Este hecho choca con los resultados obtenidos en las secciones anteriores (9 y 10) donde veíamos que las medias más altas se obtenían en la zona occidental mediterránea. Aunque choque con las anteriores secciones, concuerda con el máximo de ola registrado (figura 4) donde obtuvimos el máximo en la costa chipriota.

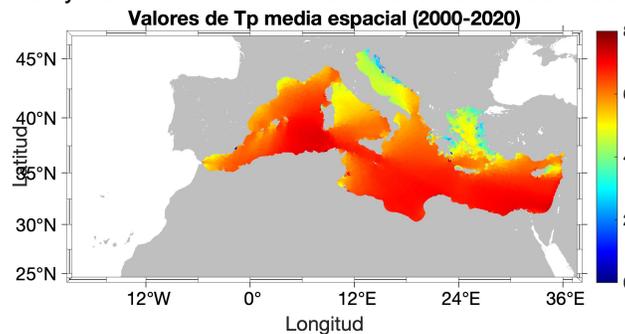
También observamos que en los últimos 20 años obtenemos unas alturas máximas significativas menores que en las dos primeras etapas. Podemos ver que tanto en la primera como en la segunda etapa se alcanzan y sobrepasan los 8 m de altura de ola significativa pero en la tercera etapa (figura 11c) no se superan esos 8 m. En la tercera etapa, además, cambia la tendencia y obtenemos máximos de ola significativa más grandes en la zona occidental del Mediterráneo, exactamente en la zona entre Baleares y Córcega y Cerdeña, lo cual concuerda con las secciones anteriores.

4.4. Media periodo de ola

Vamos a calcular y representar gráficamente ahora la media del periodo de ola en cada punto del mediterráneo para las tres etapas abarcando todos los años del estudio.



(a) Media del periodo de ola para cada punto del mediterráneo entre los años 1950 y 1975. (b) Media del periodo de ola para cada punto del mediterráneo entre los años 1975 y 2000.



(c) Media del periodo de ola para cada punto del mediterráneo entre los años 2000 y 2020.

Figura 12: Mapas con la media del periodo de ola en el área del estudio.

En la figura 12 observamos la gran semejanza entre los tres periodos. Obtenemos periodos superiores a 7 s en todo el Mediterráneo menos en los mares Egeo y Adriático y en la zona al noreste de Córcega y Cerdeña.

No observamos cambios significativos entre las tres etapas en las que se ha dividido el estudio espacial.

5. Conclusiones del estudio

- En el estudio temporal a lo largo de los años hemos visto que no parece haber relación entre el paso de los años con las alturas ni periodo de ola.
- Hemos notado claramente que las alturas de ola en invierno son mucho mayores que en verano. La explicación de este hecho reside en la cantidad de tormentas y temporales en cada estación, siendo mucho mayor en invierno.

- En las series temporales hemos notado un valle en el periodo pico de ola tanto en invierno como en verano para los años entre 1989 y 2002 en invierno y para los años entre 1985 y 1992 en verano.
- En los mapas de la distribución de los máximos de ola en el estudio en el Mediterráneo totales y por mes (6a y 6b), hemos podido ver un gran cúmulo de puntos entre Baleares y Cerdeña.
- Para el factor NAO (8a y 8b) hemos notado una leve sintonía entre el factor NAO y la altura de ola media para el invierno pero no hemos obtenido el mismo resultado para verano.
- En el estudio espacial de la media de Hs y de su percentil 90, hemos podido observar que las alturas de ola medias más altas se sitúan en zonas de gran profundidad, especialmente entre Baleares y Córcega y Cerdeña. Esto contrasta con el resultado del estudio espacial de los máximos de altura de ola significativa cuyos valores máximos se concentran en la parte oriental del Mediterráneo.
- En cuanto al periodo de ola en el estudio espacial, hemos visto periodos bajos en los mares Adriático y Egeo pero no podemos atribuir estos valores bajos a efectos de costa y poca profundidad ya que en las costa africana obtenemos valores bastante superiores que en los mares mencionados.

Referencias

- [1] Roland Aznar Lecocq. «Simulación de la circulación baroclínica del mar Mediterráneo y evaluación e impacto de la interacción océano-atmósfera». En: *UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID* (2014).
- [2] H. Giordani C. Lebeaupin V. Ducrocq. «Sensitivity of torrential rain events to the sea surface temperature based on high-resolution numerical forecasts». En: *AGU* (2006).
- [3] S. Monserrat A. Jansa y D. Gomis. «The rissaga of 15 June 2006 in Ciutadella (Menorca), a meteorological tsunami». En: *EGU* (2007).
- [4] ULPGC. URL: https://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/40/40177/oleaje_corto_plazo.pdf.
- [5] EMODnet. URL: <https://sextant.ifremer.fr/record/18ff0d48-b203-4a65-94a9-5fd8b0ec35f6/>.
- [6] Tim Toomey & Angel Amores & Marta Marcos & Alejandro Orfila. «Coastal sea levels and wind- waves in the Mediterranean Sea since 1950 from a high- resolution ocean reanalysis». En: *CSIC* (2022).
- [7] National Weather Center. URL: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/nao.shtml>.
- [8] Puertos del Estado. URL: <https://www.puertos.es/es-es/Paginas/Noticias/BorrascaGloria2020.aspx>.
- [9] Google Earth. URL: <https://www.google.com/intl/es/earth/>.
- [10] LaGuía. URL: <https://geografia.laguia2000.com/hidrografia/mar-adriatico>.