

***MAPA DE LOS FLUJOS DE ENERGÍA EN EL
ESTRECHO DE GIBRALTAR PARA SU
APROVECHAMIENTO COMO FUENTE DE
ENERGÍA RENOVABLE.***

Proyecto de Excelencia FLEGER (RNM-3738).

Junta de Andalucía.

Autores:

M^a Concepción Calero Quesada

José Carlos Sánchez Garrido

Jesús García Lafuente

Grupo de Oceanografía Física (GOFIMA)

Universidad de Málaga



Contenido

1.- Introducción.....	3
2.- Metodología.....	7
2.1.- Modelo numérico.....	7
2.2.- Marco teórico.....	8
3.- Análisis descriptivo de los flujos de energía.....	11
4.- Otros indicadores.....	35
4.1.- Definición y cálculo de indicadores.....	35
4.2.- Patrón espacial de los indicadores.....	39
5.- Idoneidad de las distintas regiones.....	55
5.1.- Evaluación de la idoneidad.....	55
5.2.- Patrón espacial.....	57
6.- Resumen y conclusiones.....	63
7.- Referencias.....	66
Apéndice 1.- Ondas Internas.....	68



1.- Introducción.

La explotación de las fuentes convencionales de energía tiene graves consecuencias en el calentamiento global y además hace que países como el nuestro, carentes de dicho recurso, sea fuertemente dependiente de terceros con todas las dificultades económicas que esto acarrea. La incorporación de energías renovables locales permite aliviar ambos problemas.

Existen diferentes formas de extracción de energía del mar como la que se obtiene a partir de las mareas, del oleaje y de las corrientes marinas pero en el Estrecho de Gibraltar ésta última la convierte en una región privilegiada a escala global (Candela et. al., 1990; García Lafuente et.al., 2000; Bruno et. al., 2002, Sánchez Román et. al., 2009). Conceptualmente, la física y por tanto, la tecnología son análogas al proceso de extracción de energía del viento. La potencia extraíble de las corrientes marinas es proporcional a la densidad del fluido y al cubo de su velocidad. A título de ejemplo, el flujo de energía de una corriente estable y permanente de 1 ms^{-1} (cifra de referencia a la hora de pensar en rentabilidad) es de unos 500 Wm^{-2} , de modo que una turbina de palas tipo molino eólico, cuya eficiencia alcanza valores por encima de 0.4 para turbinas de tres palas (Burton et. al., 2001), que son más eficientes que las de eje vertical tipo Daerrius (Gorban et. al., 2001), puede extraer unos 60 kw de potencia en continuo, equivalente a 0.52 GWh al año. Cuando una turbina de este tipo se diseña para trabajar inmersa en el mar, es deseable que mantenga una orientación fija, lo que la sitúa en desventaja con sus homólogas eólicas que son orientadas para encarar el viento y no precisan por ello de vientos constantes en dirección. Por tanto, para que la extracción de energía a partir de las corrientes marinas sea rentable y técnicamente realizable a coste razonable es deseable que las corrientes sean unidireccionales y de cierta intensidad.

No es fácil encontrar en el océano lugares que reúnan estos dos requisitos, unidireccionalidad e intensidad de corriente relativamente alta. En nuestras costas, ciertas áreas del Estrecho de Gibraltar reúnen condiciones favorables para la instalación de centrales eléctricas de este tipo y se localizan relativamente cerca de costa. La distancia desde costa hasta el lugar donde ubicar la central, no debería ser superior a decenas de km de lo contrario conllevaría importantes pérdidas y elevados costes de transporte para incorporar la energía generada a la red eléctrica. El Estrecho es un lugar donde se ha desarrollado y continúa desarrollándose una intensa actividad de investigación oceanográfica y su dinámica está bastante bien comprendida. Sin embargo, los lugares en los que la teoría de la dinámica del intercambio de aguas predice la existencia de intensas corrientes unidireccionales no están totalmente descritos y faltan detalles que son importantes a la hora de llevar adelante un proyecto de ingeniería encaminado a extraer este tipo de energía del océano.

El Estrecho tiene dos mitades bien diferenciadas, la parte oriental angosta y bastante profunda y la occidental, más ancha y sensiblemente menos profunda. Ambas mitades quedan separadas por la sección del umbral principal de Camarinal que representa el “cuello de botella” del Estrecho (mínima sección transversal).

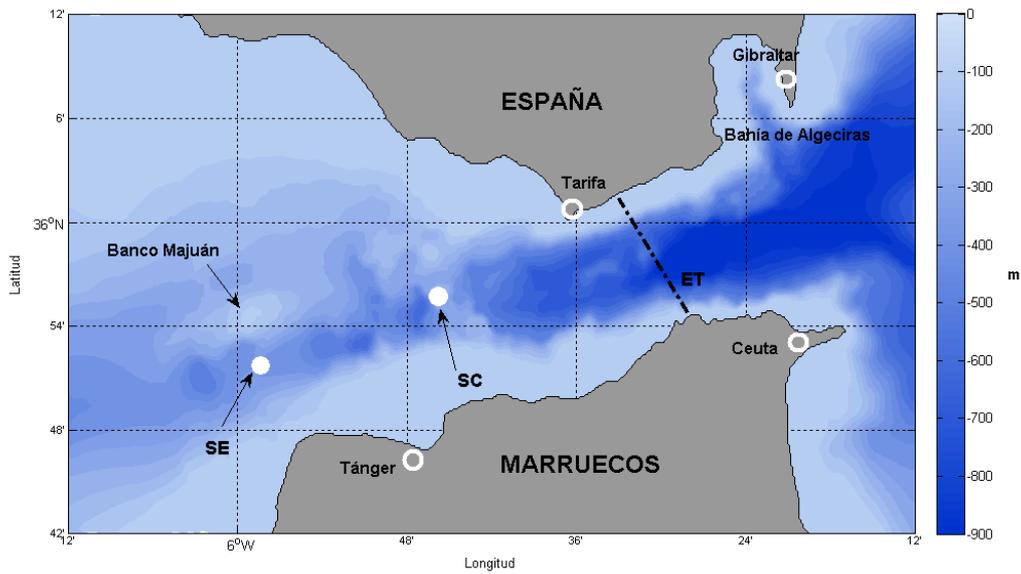


Figura 1.- Mapa del Estrecho de Gibraltar con la batimetría. En él se han ubicado las secciones que más se nombran en este trabajo: SE es la sección del umbral de Espartel; SC, sección del umbral de Camarinal y ET, el Estrechamiento de Tarifa, la zona más angosta del Estrecho.

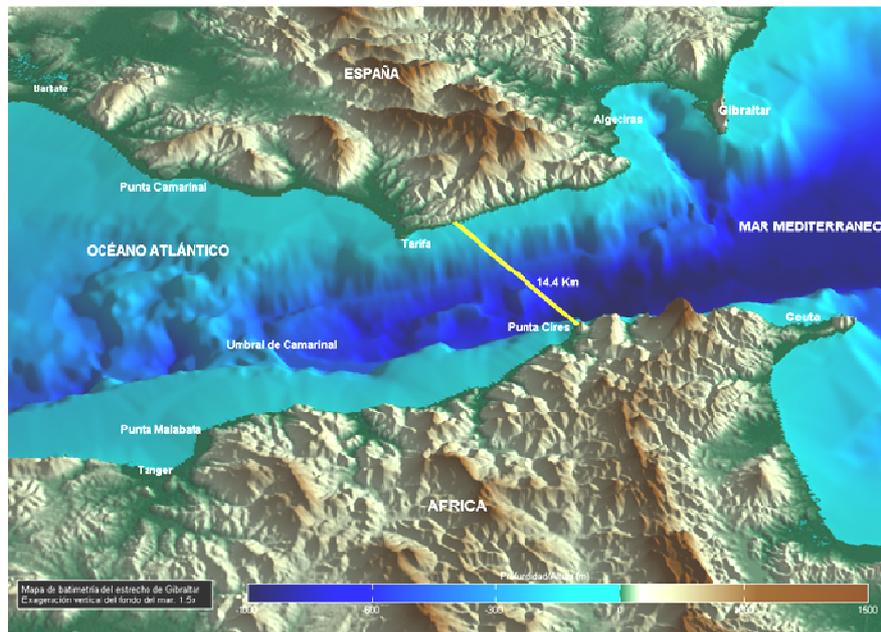


Figura 2a.- Vista aérea del Estrecho de Gibraltar en 3D desde el continente africano. Igualmente que en la figura 1. Se señalan, también, las características más importantes de la topografía.

Existe un doble intercambio a través del Estrecho de Gibraltar en el cual, las aguas de origen atlántico, relativamente dulces y cálidas entran en superficie mientras que las aguas de origen mediterráneo escapan como contracorriente profunda, más salinas y frías. La parte más estrecha



(ET, figura 1) controla el volumen de agua atlántica entrante en sentido hidráulico, es decir, estableciendo una sección de control (Armi y Farmer, 1985, 1988; Bryden y Kinder, 1991; García Lafuente y Criado Aldeanueva, 2001; Delgado et. al, 2001). Al este de esta sección de control el flujo entrante acelera hasta alcanzar su máxima velocidad, con valores de pico de 1.5 ms^{-1} (García Lafuente et. al., 2000). A través de esta sección, el flujo saliente se mueve con mucha menor velocidad debido a la gran profundidad y área transversal de salida por la que fluye.

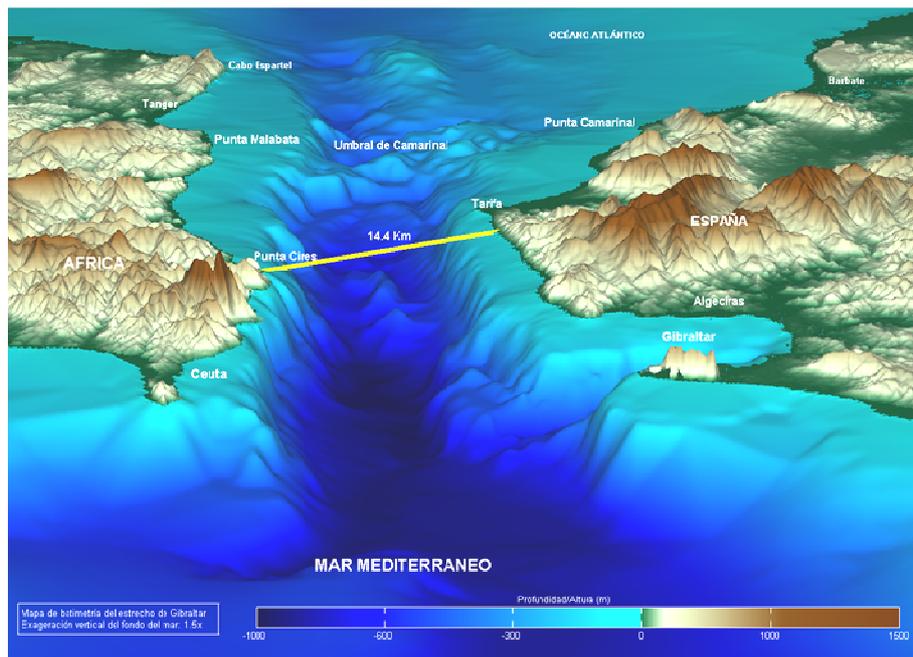


Figura 2b.- Vista aérea del Estrecho desde el mar Mediterráneo.

En el umbral de Camarinal (SC, figuras 1 y 2) se establece una segunda sección de control que afecta principalmente al flujo saliente. Por la sección de Camarinal y durante la marea creciente (hacia el Atlántico) pasa más agua mediterránea de la que deja pasar el control de la sección del umbral de Espartel (SE, figuras 1 y 2b) de modo que se acumula en la cuenca de Tánger y levanta la interfase desplazando más agua atlántica hacia el Atlántico que se añade a la proveniente del este del umbral de Camarinal. Sobre este umbral, el flujo mediterráneo es muy rápido pero al acumularse agua en la cuenca de Tánger pierde energía cinética y sufre una transición a través de un salto hidráulico interno. Una parte importante de esta energía cinética perdida se transforma en potencial al elevar la interfaz y producir mezclas y otra se pierde en turbulencias asociadas al salto hidráulico.

Las corrientes de marea son intensas en el Estrecho de Gibraltar (Candela et. al., 1990; García Lafuente et. al., 2000; Bruno et. al., 2002; Sánchez Román et. al., 2009). Por esta razón, la norma general esperada es que las corrientes totales inviertan en cada lugar y profundidad durante el ciclo de marea y, salvo contadas excepciones, así ocurre. En particular, eso ocurre en el umbral de



Camarinal causando pérdidas en el control hidráulico de forma que el flujo mareal al dirigirse hacia el Mediterráneo, hace descender la interfase al este de Camarinal, lo que se traduce en la liberación de un solitón interno que se desintegra en trenes de onda de gran amplitud a medida que se desplaza hacia el interior del Mediterráneo (Armi y Farmer, 1988; Bruno et. al., 2002; Sánchez Garrido et. al., 2008, 2011). Tras la liberación del solitón, la corriente mediterránea saliente invierte durante un cierto tiempo (alrededor del 30% del ciclo de marea) y se mueve hacia el Mediterráneo. El flujo mareal también hace descender la interfase en la cuenca de Tánger con un doble efecto y es que desplaza agua mediterránea hacia el Mediterráneo a través de Camarinal y evacúa agua mediterránea hacia el Atlántico a través de la sección de Espartel. En el primer caso, la corriente atlántica favorecida por el flujo mareal sigue hundiendo la interfase en la cuenca de Tánger y al este de Camarinal y alimenta así la señal de marea en el límite oriental. En el segundo caso, evacua agua mediterránea hacia el Atlántico a través de Espartel donde el flujo se acelera de nuevo al disminuir la profundidad y reducirse la sección de salida por la presencia del Banco Majuán de modo que el agua Mediterránea alcanza de nuevo velocidades supercríticas en el umbral de Espartel (picos cercanos a los 2 m/s, Sánchez Román et. al., 2009).

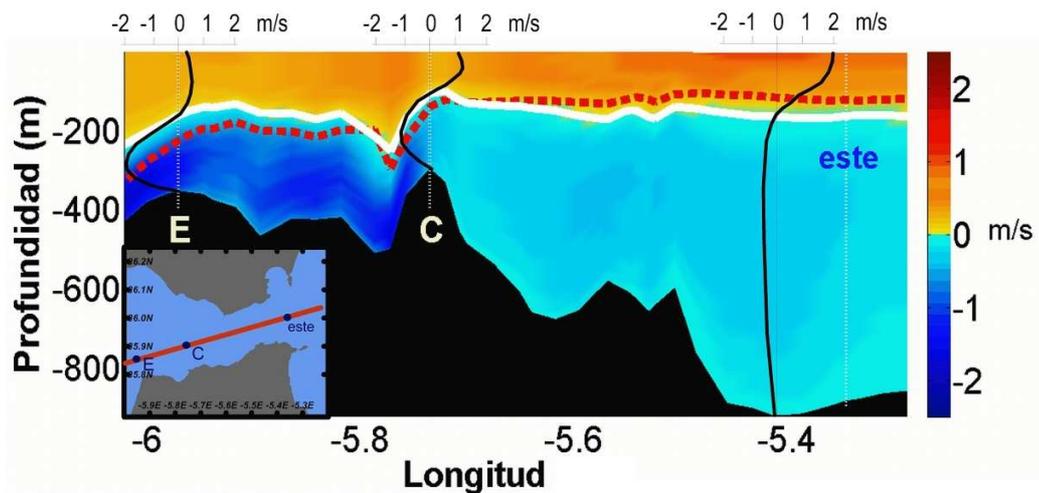


Figura 3.- Velocidades medias a lo largo de la sección indicada por la línea roja en el mapa insertado en la esquina inferior izquierda. Los colores azules indican velocidades hacia el Atlántico, los rojos hacia el Mediterráneo y la línea gruesa blanca la interfase de velocidad cero (que no coincide con la interfase de salinidad, $S=37.5$, usualmente tomada como superficie separadora de las aguas atlánticas y mediterráneas línea roja de trazos). Las líneas negras muestran esos perfiles medios de velocidad referidos a la escala que aparece en la parte superior de cada una de las tres gráficas. E y C indican los umbrales de Espartel y Camarinal, respectivamente. El mapa ha sido confeccionado con la salida del modelo numérico CEPOM desarrollado por el ENEA (Sannino et. al., 2002, 2004).

Sin embargo, los controles hidráulicos del umbral de Espartel y del Estrechamiento de Tarifa no llegan a desbordarse, lo que lleva a que la corriente entrante en el Mediterráneo al este del control hidráulico de Tarifa y la saliente al oeste del umbral de Espartel mantenga un alto grado de permanencia del sentido del flujo independientemente del forzamiento de marea. Estos lugares reúnen, en principio, condiciones muy favorables a partir de corrientes marinas.



2.- Metodología.

2.1.- Modelo numérico.

Los distintos cálculos y estimaciones hechos en este trabajo se basan en las simulaciones numéricas realizadas con el modelo de circulación general del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MITgcm), que ha mostrado reproducir muy satisfactoriamente la hidrodinámica del intercambio a través del Estrecho (*Sánchez Garrido 2009; Sánchez Garrido et. al 2011; Sannino et. al 2009*).

Este modelo resuelve las ecuaciones no lineales y no hidrostáticas de Navier-Stockes bajo las aproximaciones de Boussinesq para un fluido incompresible que ocupa un volumen finito en el espacio. Se discretiza en una red curvilínea computacional. La formulación del modelo, que lleva implícito superficie libre y la topología de paso espacial, está descrita en detalle por *Marshall et. al (1997.a, 1997.b)* y su código fuente y documentación están disponibles en la página web del Grupo MITgcm (http://mitgcm.org/sealion/on-line_documents/node2.html).

El dominio del modelo se extiende de 6.3º W a 4.78º W y está discretizado por una red ortogonal curvilínea no uniforme de 1440 × 210 puntos. La resolución espacial a lo largo del eje longitudinal del Estrecho, Δx , (transversal al eje del Estrecho, Δy), están en el rango entre los 46 y 63 m (175-220 m) en el área del umbral de Camarinal (figura 1 y 2) y el tamaño de la malla es siempre menor de 70 m (340 m) en medio del Estrecho en el umbral de Espartel (figura 1 y 2b) y CS, y es menor de 70 m (200 m) entre CS y el Estrechamiento de Tarifa, la sección más estrecha del Estrecho (figuras 1 y 2). Para resolver adecuadamente la pínodina, el modelo tiene 53 niveles verticales con un espesor de unos 7.5 m en los primeros 300 metros de la columna de agua y aumenta gradualmente hasta un máximo de 105 m para los restantes 13 niveles del fondo.

La topografía del modelo se ha obtenido por la fusión de la batimetría de ETOPO2 [NOAA, 2006] con una carta de alta resolución (*Sanz et. al., 1991*). Se han impuesto condiciones de contorno no cerradas en el fondo y en los límites sólidos laterales.

El esquema de advección seguido es un esquema de flujo limitado en el espacio y en el tiempo de tercer orden (*Hundsdorfer et. al., 1995*), que es incondicionalmente estable y no requiere de una difusión adicional. Siguiendo los experimentos numéricos de *Vlasenko et. al., (2009)* en la investigación de la evolución 3D de ondas internas de gran amplitud en el Estrecho de Gibraltar se ha usado la parametrización turbulenta para la viscosidad vertical y la difusividad propuesta por *Pacanowski y Philander (1981)*

$$\nu = \frac{\nu_0}{(1+\alpha R_i)^n} + \nu_b, \quad \kappa = \frac{\nu}{(1+\alpha R_i)} + \kappa_b$$

Donde $R_i = \frac{N^2(z)}{u_z^2 + v_z^2}$ es el número de Richardson, $\nu_b = 1.5 \cdot 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$, $\kappa_b = 1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ son valores de referencia de los coeficientes y $\nu_0 = 1.5 \cdot 10^{-2} \text{ m s}^{-1}$ $\alpha = 5$ y $n = 1$ son los parámetros



ajustables. El coeficiente de difusividad horizontal es $\kappa_h = 1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, mientras que la viscosidad horizontal variable sigue la parametrización de *Leith* (1968).

Las condiciones iniciales para la temperatura y la salinidad se han tomado de la base de datos climatológica Medar-MedAtlas (*MEDAR Group, 2002*) para el mes de abril. La media del doble intercambio se ha obtenido por el forzamiento lateral del modelo a través de la imposición de las velocidades medias baroclinas y los valores de variables pasivas (T, S) dadas por el modelo desarrollado por *Sannino et. al., (2009)* para estudiar el intercambio de agua a través del Estrecho y su comportamiento hidráulico. El modelo corre inicialmente 11 días sin forzamiento mareal con la intención de conseguir el doble intercambio medio o cuasi estacionario. Subsecuentemente, se introduce el forzamiento mareal como corrientes de marea barotrópica en los contornos abiertos dando los valores de amplitudes y fase de las principales constituyentes diurnas (O_1, K_1) y semidiurnas (M_2, S_2). Las reflexiones de onda en los contornos abiertos se minimizan añadiendo el término de relajación newtoniano en el contorno adoptando el esquema de relajación de flujo propuesto por *Carter y Marrisfield (2007)* para la velocidad.

La simulación con el forzamiento mareal incluido se extiende 8 días más para obtener una solución estacionaria y periódica. Conseguido este estado estacionario periódico se ha dejado ejecutar el modelo para un mes tropical completo y almacenado sus salidas cada 20 minutos. Esta información es la base del análisis realizado en este informe.

2.2.- Marco teórico.

El primer objetivo de este trabajo es llevar a cabo una descripción de la intensidad de los flujos de energía en el Estrecho de Gibraltar dividiéndolo en capas de diferente espesor. Esta descripción se ha realizado con los datos de salida del modelo descrito en el apartado anterior. Para visualizarlos se han representado secciones horizontales.

Conocidos del modelo los datos de velocidad, se obtiene el flujo de energía como el vector

$$\bar{E} = \rho_{\text{energía}} \bar{v} \quad (1)$$

donde \bar{v} es la velocidad de la corriente y $\rho_{\text{energía}}$ es la densidad de energía cinética. La ecuación (1) se escribiría:

$$\bar{E} = \frac{1}{2} \rho (v_x^2 + v_y^2) \bar{v} \quad (2)$$

cuyas componentes en coordenadas cartesianas son

$$E_x = \frac{1}{2} \rho (v_x^2 + v_y^2) v_x \quad E_y = \frac{1}{2} \rho (v_x^2 + v_y^2) v_y \quad (3) \text{ y } (4)$$

donde ρ es la densidad del agua del mar, \bar{v} es la velocidad y v_x y v_y las componentes de la velocidad en la dirección longitudinal y transversal del Estrecho, respectivamente. La corriente



circula principalmente a lo largo del eje longitudinal del Estrecho, por tanto, en este trabajo se ignora la componente transversal del flujo y se calcula el módulo de la intensidad del flujo de energía con la siguiente expresión:

$$E = \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2) u \quad (\text{W/m}^2) \quad (5)$$

donde u es la componente longitudinal de la velocidad en el Estrecho y v es la componente transversal de la velocidad, ambas obtenidas directamente de las salidas del modelo.

Con la ecuación (5) se calcula el flujo de energía en cada punto de la malla 3D. Debido al elevado número de matrices que resultan (2189 matrices, una para cada instante de tiempo) se toma como valor representativo del flujo en cada capa al promedio temporal, puesto que nos interesa conocer el comportamiento de los flujos en régimen medio. No resulta indicativo encontrar los valores extremos ya que si éstos tienen lugar durante un corto periodo de tiempo se puede sobredimensionar o infravalorar la capacidad de obtención de energía del Estrecho. Por otro lado, al optar por representar valores medios por capas, se ha de calcular el promedio vertical entre los contornos que definen la capa. La variable representada es, por tanto,

$$E_k = \frac{1}{h_k} \frac{1}{t_0} \int_{t_1}^{t_1+t_0} \int_{z_k}^{z_{k+1}} E dt dz \quad (6)$$

Donde $h_k = |z_{k+1} - z_k|$ es el espesor de la capa k ($k = 1, 2, \dots$ ver tabla 1), t_0 es el intervalo de tiempo sobre el cual se calcula el promedio y $E(x, y, z, t)$ es el flujo de energía calculado mediante (5).

En función de las variables discretas la expresión (6) se escribirá

$$E_k(x, y) = \frac{1}{N_k} \frac{1}{N_T} \sum_{i=1}^{N_T} \sum_{j=1}^{N_k} E(x, y, z_j, t_i) \quad (7)$$

donde t_i son los instantes de tiempo en el intervalo t_0 usado para promediar y z_j los puntos de malla entre los contornos que definen la capa k .

En la tabla 1 se muestran las capas en las que se ha dividido verticalmente el Estrecho de Gibraltar. Se ha situado el nivel más superficial, que coincide con el nivel superior de la capa 1, a 26 m de profundidad para dejar espacio suficiente destinado a operaciones de tráfico marítimas y similares.

Los intervalos de tiempo t_0 entre los que se calcula el promedio temporal de los flujos de energía en la ecuación (7) son los que se indican a continuación:

- 1.- Durante el periodo total en que mide el modelo, recordemos que es un mes tropical.
- 2.- Durante el periodo total en que mide el modelo pero considerando sólo los casos en que el flujo toma valores positivos, o lo que es lo mismo, v_x tiene signo positivo, que implica flujo entrante al Mediterráneo.



Flujos de energía en el Estrecho de Gibraltar. Proyecto FLEGER (RNM-3738).

3.- Igual que en el caso anterior pero cuando el flujo toma valores negativos, v_x tiene signo negativo, esto es para flujo saliente.

4.- Durante un periodo de mareas vivas, aproximadamente 7.5 días *.

5.- Durante un periodo de mareas vivas considerando los casos en que el flujo es positivo, análogo al punto 2.

6.- Igual que en el caso anterior pero cuando el flujo es negativo.

7.- Durante un periodo de mareas muertas, aproximadamente 7.5 días *.

8.- Durante el periodo de mareas muertas considerando los casos en que el flujo es positivo.

9.- Igual que el caso anterior pero cuando el flujo es negativo.

De esta forma resulta un total de nueve figuras para describir la intensidad del flujo en cada capa.

Capa	Nivel más superficial (m)	Nivel más profundo (m)	Nº de niveles en la capa
1	26.25	71.25	7
2	71.25	116.25	7
3	116.25	161.25	7
4	161.25	206.25	7
5	206.25	258.75	7
6	258.75	296.75	7
7	296.75	386.25	5
8	386.25	427.50	2

Tabla 1.- Capas en las que se ha dividido el Estrecho de Gibraltar (primera columna a la izquierda), los niveles de profundidad de sus contornos (segunda y tercera columna) y el número de puntos de malla en la vertical.

* Los límites de mareas vivas y mareas muertas no están bien definidos; sí queda mejor definido el ciclo quincenal de mareas vivas y mareas muertas. Por tanto, se debe tener en cuenta que la elección de 7.5 días que se ha tomado para mareas vivas y mareas muertas es una aproximación.



3.- Análisis descriptivo de los flujos de energía.

Se presenta a continuación los resultados del cálculo de flujos de energía promediados en cada una de las capas de la Tabla 1 según lo indicado en la ecuación (6). La visualización de los resultados se hace en los mapas de las figuras 4 a 10 mediante contornos que indican la magnitud del flujo. En todas las figuras se ha mantenido la misma escala de modo que, visualmente, son directamente comparables.

Todas las figuras llevan incorporada una leyenda explicativa en la parte inferior derecha que aclara lo que se representa en cada panel. Concretamente se dan 5 indicadores, a saber:

- “Flujo”: puede tomar los valores “medio”, “positivo” y “negativo”. El primero indica valor medio sin tener en cuenta la dirección de la corriente, es decir, la media de todos los valores durante el periodo de tiempo considerado. “Positivo” significa que del periodo seleccionado se han extraído los datos con velocidad positiva (entrante en el Mediterráneo) y se ha calculado su media. “Negativo” significa lo contrario, es decir, media de valores en los que la corriente es hacia el Atlántico.
- “Periodo”: puede ser “total”, “MV” (mareas vivas) o “MM” (mareas muertas). El valor “total” indica que el promedio se ha hecho sobre el conjunto de datos del mes sinódico simulado, “MV” se refiere a un promedio hecho sobre un periodo de 7.5 días centrado en época de mareas vivas y “MM” sobre un periodo de 7.5 días centrado en mareas muertas.
- “Capa” indica el número de la capa que se estudia siguiendo el orden especificado en la Tabla 1.
- “ z_0 ” especifica la profundidad que define el contorno superior de la capa en cuestión.
- “ z_f ” hace lo propio con el contorno inferior.

Los tres últimos indicadores sólo pueden tomar un valor, mientras que los dos primeros pueden tomar tres valores cada uno. El número de posibles combinaciones es 9 en cada capa, es decir, 9 paneles para mostrar los resultados del análisis.

Los valores de flujo medio (paneles “a” en figuras 4 a 10) muestran el resultado esperado en un flujo bicapa, encontrándose valores relativamente altos en las capas más superficiales de la parte oriental del Estrecho (figuras 4 y 5) y en las más profundas en la parte occidental (figuras 7 a 10). La capa 3, la mayor parte de la cual abarca lo que podríamos llamar la capa interfacial, muestra valores mínimos debido a que en ella ocurre la inversión de velocidad desde entrante (capas superiores) a saliente (capas inferiores).



Cuando se repite el análisis separando velocidades entrantes (paneles “b” de las figuras 4 a 10) y salientes (paneles “c”), aparece el mismo patrón pero con mucha más claridad. Los flujos de energía mayores aparecen en la parte este del Estrecho en la capa superior y en la parte occidental en las capas más profundas. De hecho, en estas últimas y en esta zona el flujo medio debido a corrientes entrantes (positivas, paneles “c” en figuras 8 a 10) es prácticamente nulo dando a entender que la corriente es casi permanentemente saliente.

Al hacer el estudio por periodos de mareas vivas (paneles “d”, “f”, “g”) y mareas muertas (paneles “e”, “h”, “i”) se obtiene el resultado esperado de que los flujos de energía son superiores en los periodos de mareas vivas. Esto es especialmente claro en la capa superficial, dando a entender que en ella la dinámica de mareas es importante y que buena parte de la energía extraíble reposa en la parte de la corriente asociada a las mareas. Sin embargo, en las capas más profundas la diferencia no es tan evidente entre uno y otro periodo (comparar por ejemplo los paneles “g” e “i” en las figuras 8, 9 y 10 que se corresponden con las capas 5, 6 y 7) dando a entender que en estas profundidades y en esta zona la energía reposa fundamentalmente en la parte media de la corriente, no en la asociada con la marea. Notar también cómo en esas figuras el flujo positivo (hacia el Mediterráneo) no tiene ninguna importancia (paneles “f” y “h” de las citadas figuras).

Este patrón espacial no es ni más ni menos que el reflejo de la compleja dinámica mareal en el Estrecho (Ver Sánchez Román et al., 2009). La presencia del control hidráulico en Camarinal y Espartel hace que la corriente total apenas cambie de signo en la capa Mediterránea en la parte occidental del Estrecho (la capa Mediterránea se sitúa por debajo de, aproximadamente, los 150m en la parte occidental, lo que afecta a las capas 4 a 7 en la tabla 1) y que la señal de marea se atenúe notablemente. Las dos consecuencias inmediatas de este comportamiento son 1) que los flujos positivos, es decir, hacia el Mediterráneo se desvanezcan y los negativos se amplifiquen y 2) que apenas haya diferencia entre épocas de diferente intensidad de marea (“vivas” versus “muertas”). Algo similar se espera que ocurra en las capas más superficiales en la parte oriental debido al control hidráulico en la sección de mínima anchura cerca de Tarifa. Sin embargo las figuras 4 y 5 no muestran ese comportamiento pues sí se observa cierta importancia de los flujos negativos (aquí los positivos son los que tienen importancia) y una modulación “mareas vivas” – “mareas muertas”. Se quiere mencionar sin embargo que el presente análisis ha omitido por razones operativas la capa más superficial (0-26 m) donde estos efectos que se comentan son más evidentes.



Figura 4.- Distribución espacial de los flujos de energía para la capa 1. Los distintos paneles muestran valores para distintos periodos y condiciones mareales y las posibles direcciones del flujo de energía (ver texto para detalles).

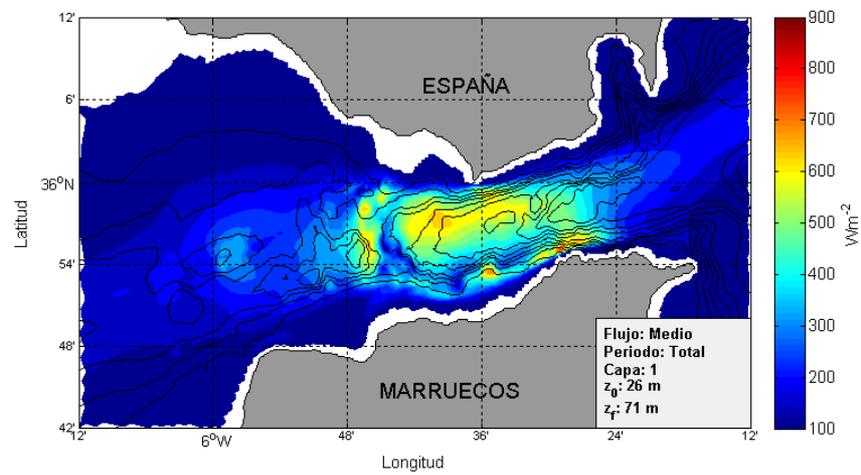
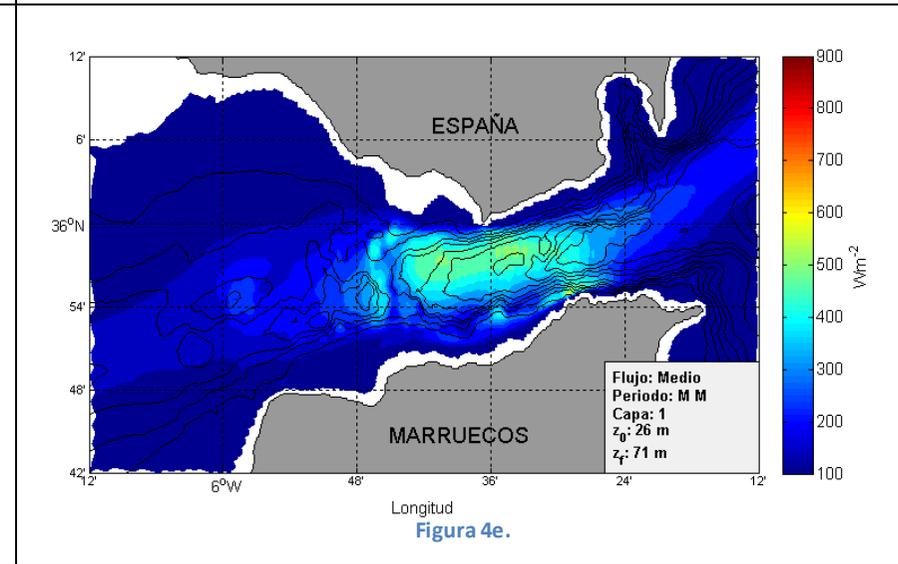
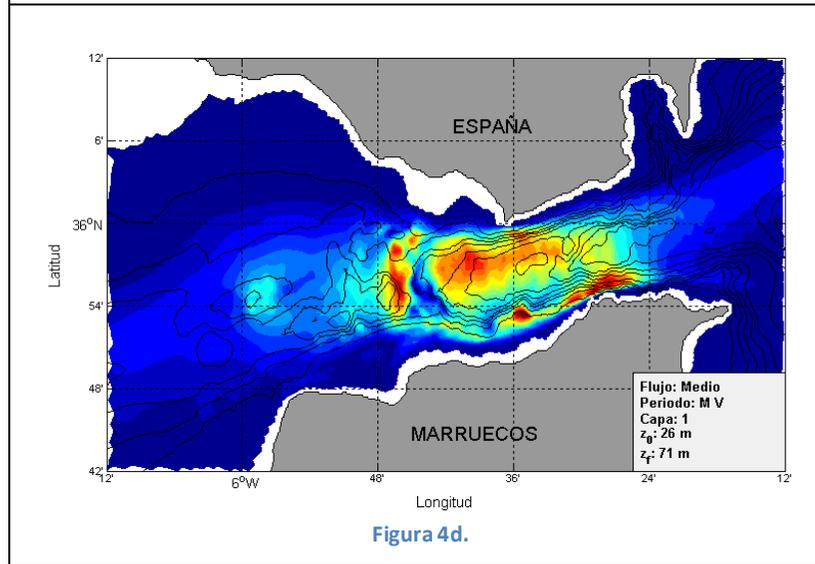
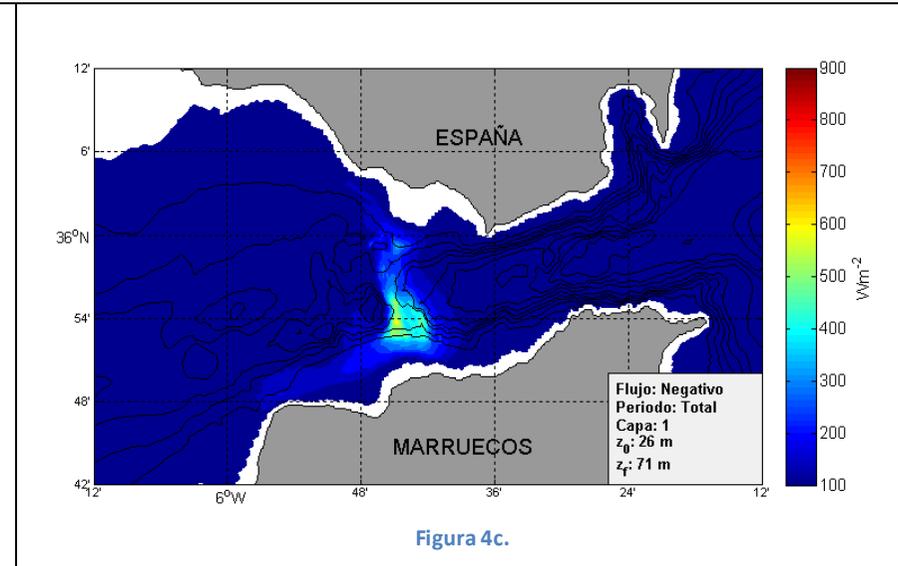
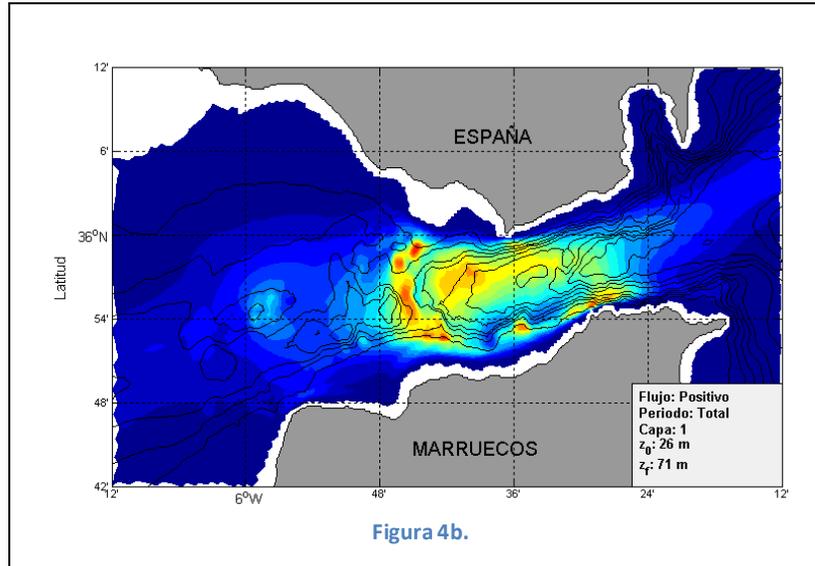


Figura 4a.



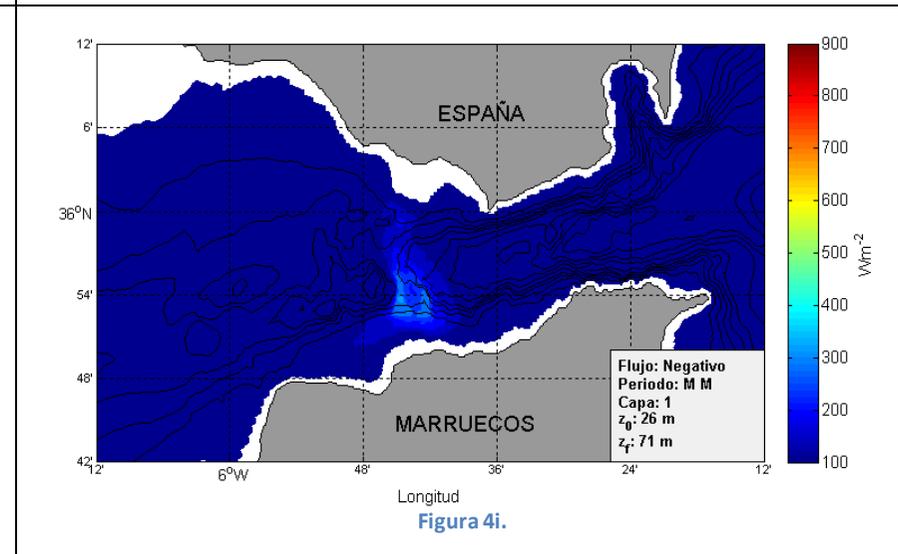
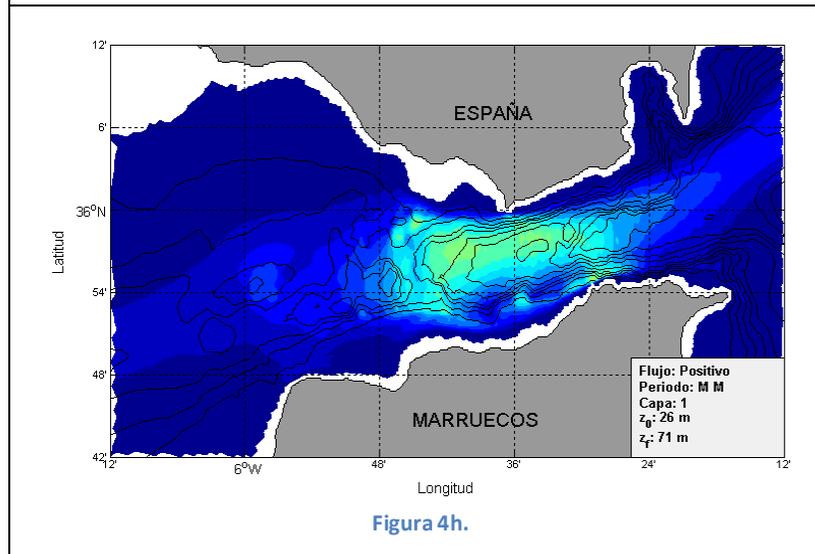
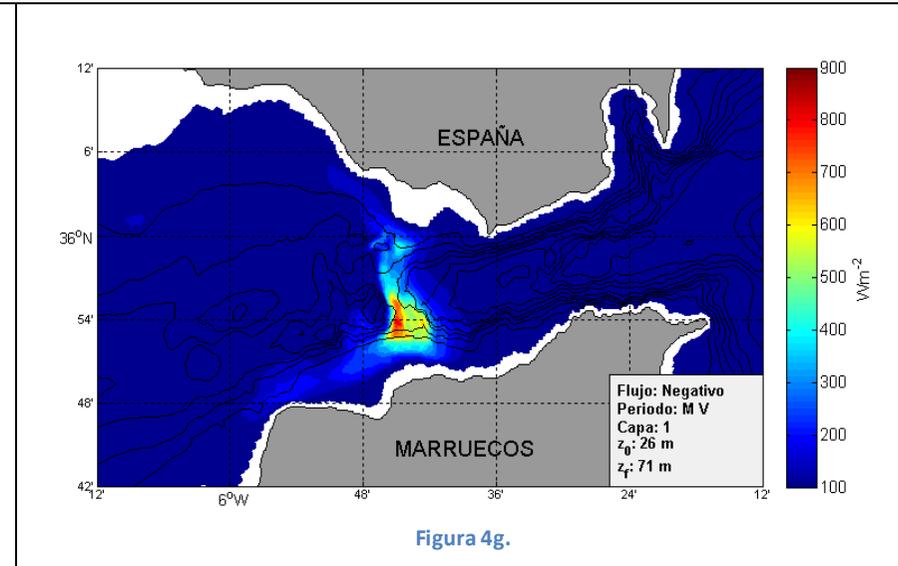
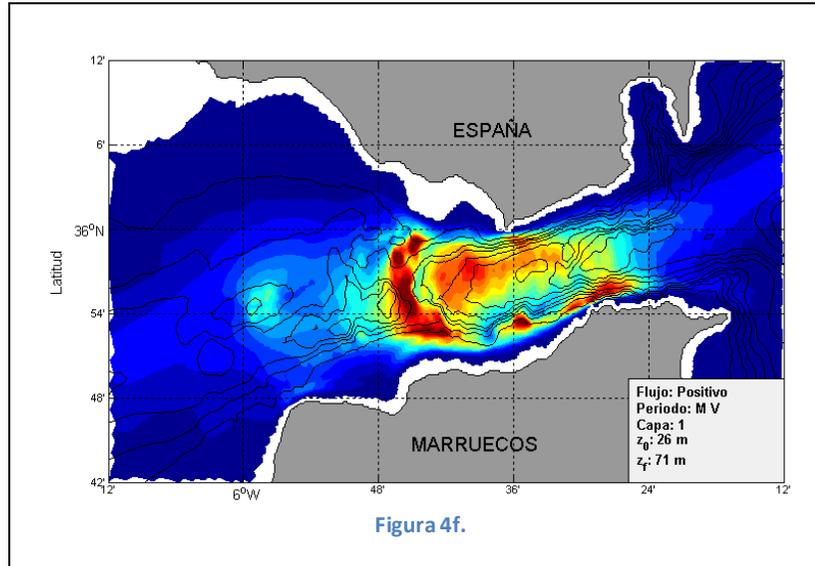




Figura 5.- Mismo que figura 4 para la capa 2.

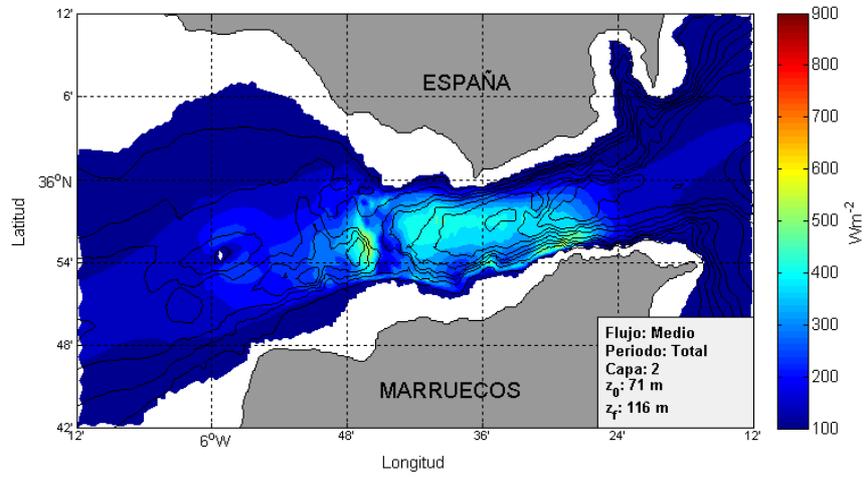
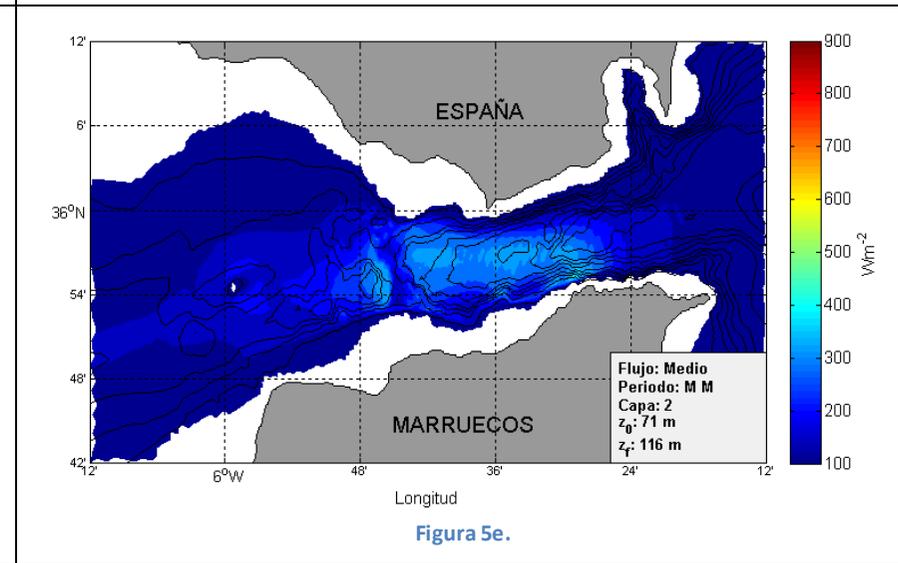
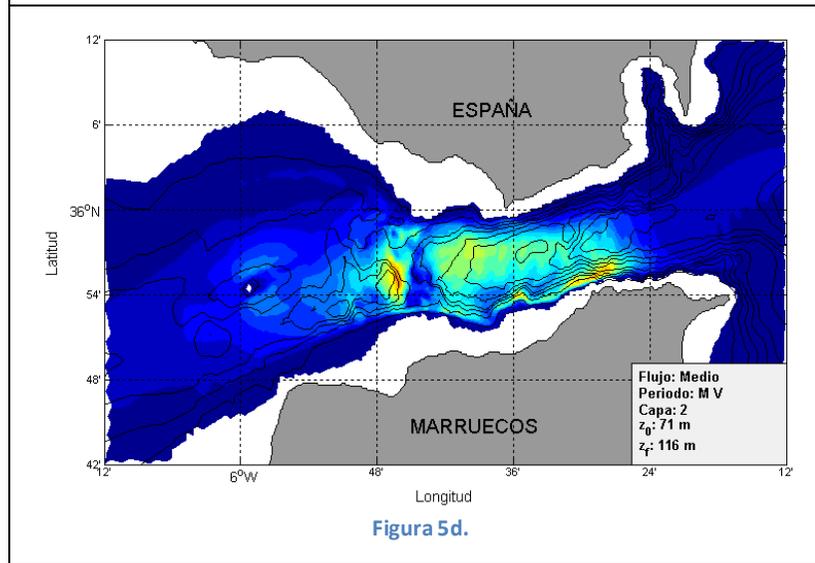
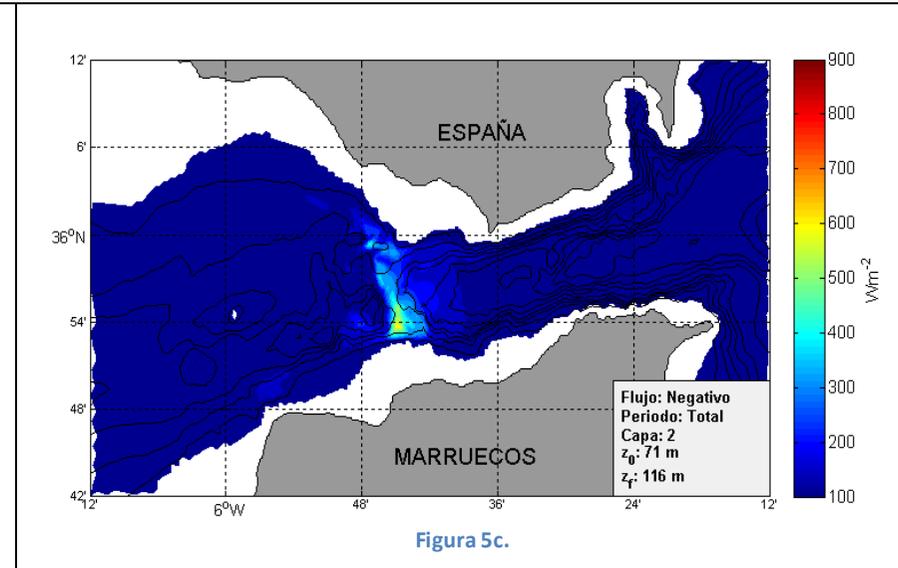
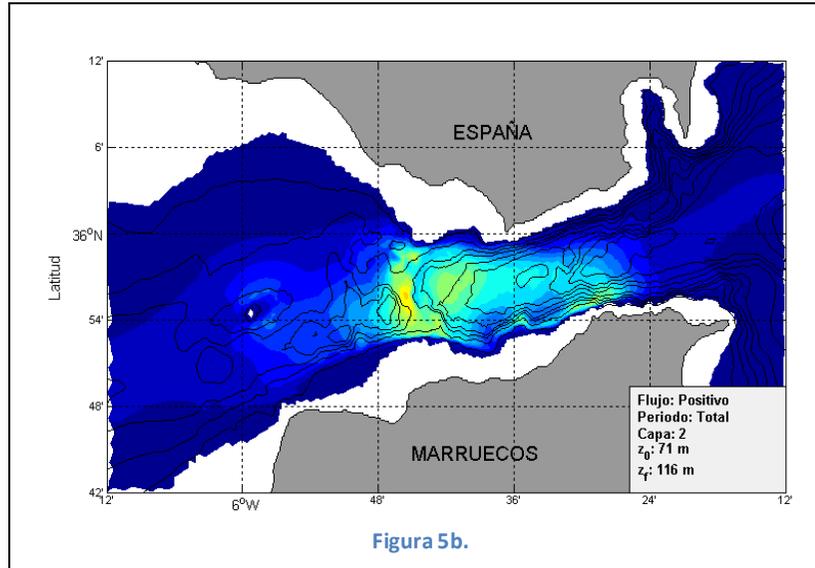


Figura 5a.



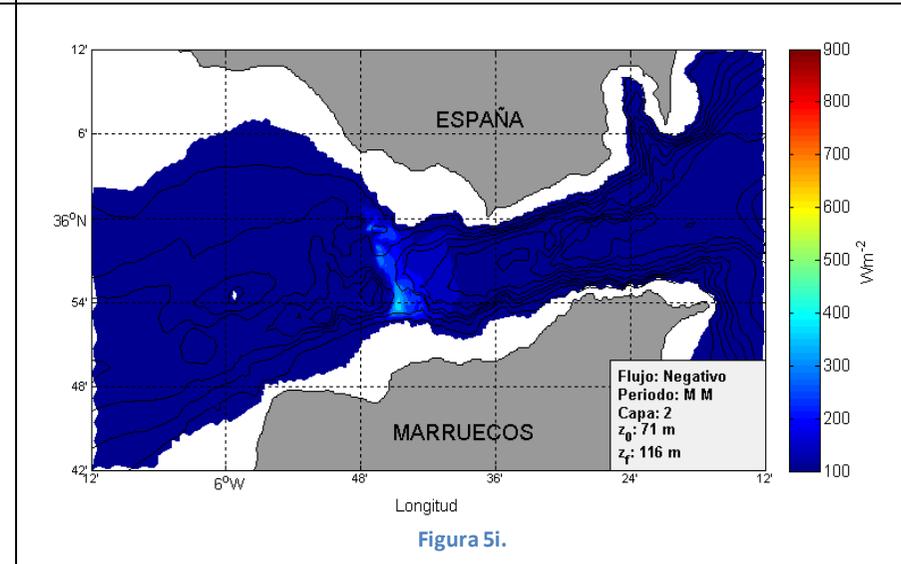
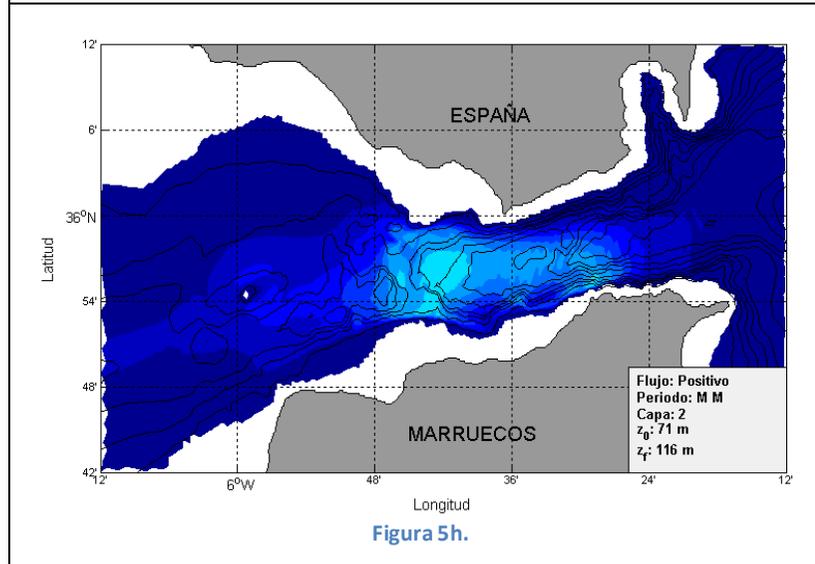
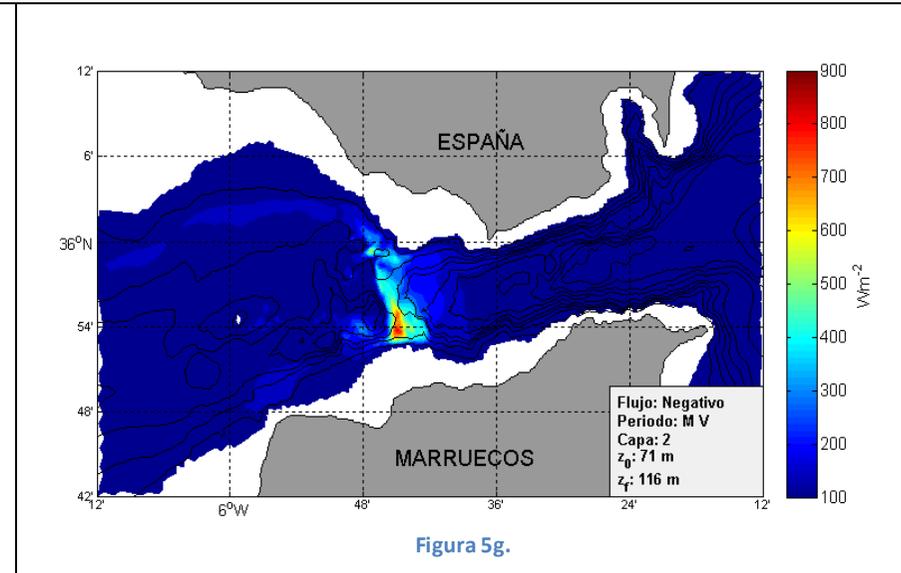
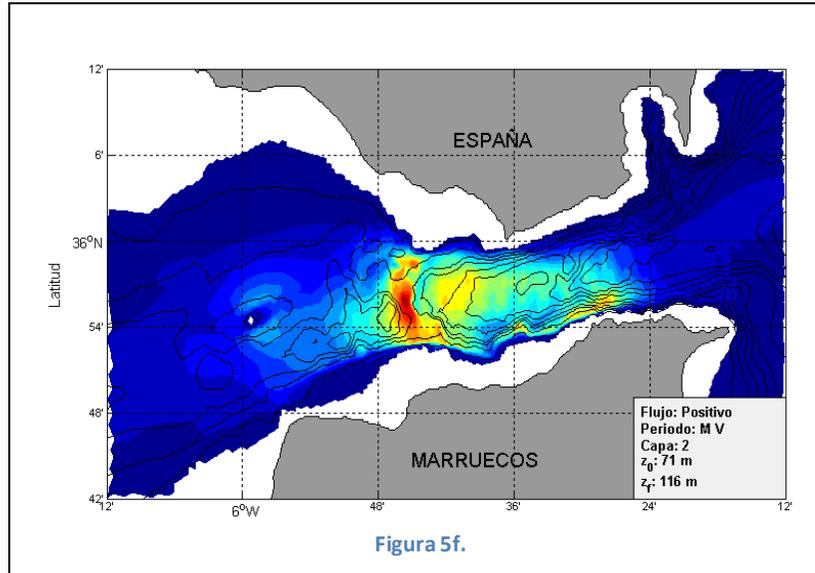




Figura 6.- Mismo que figura 4 para la capa 3.

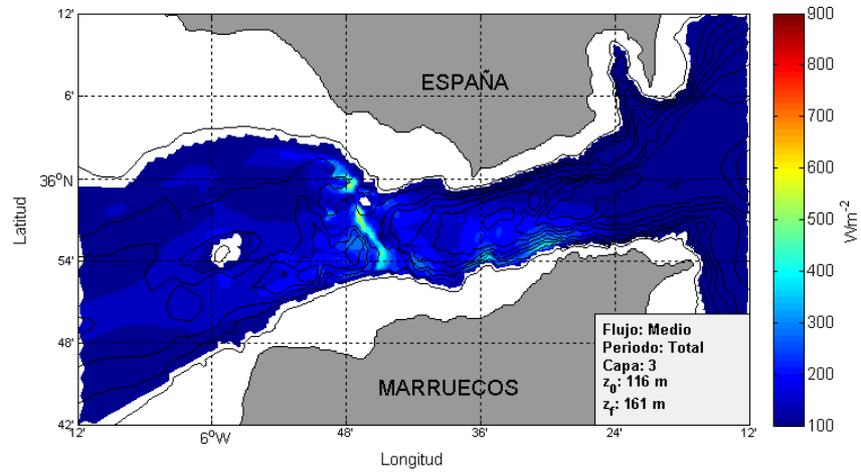


Figura 6a.

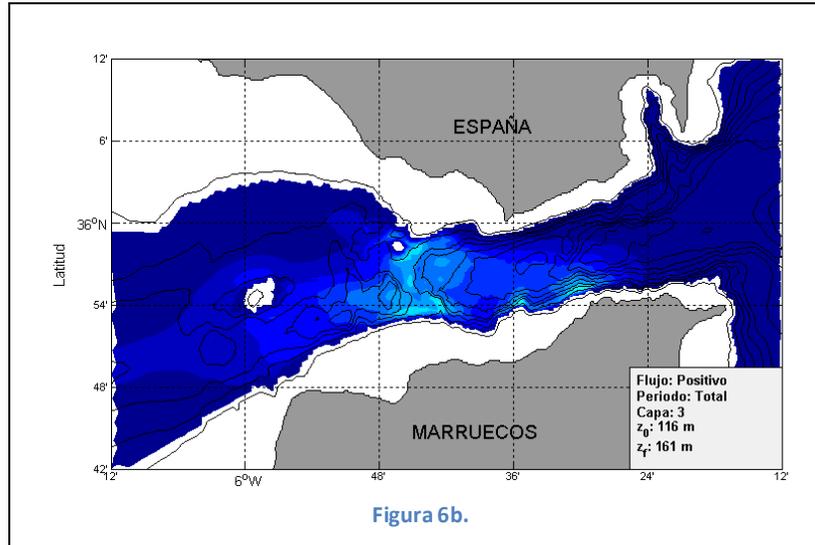


Figura 6b.

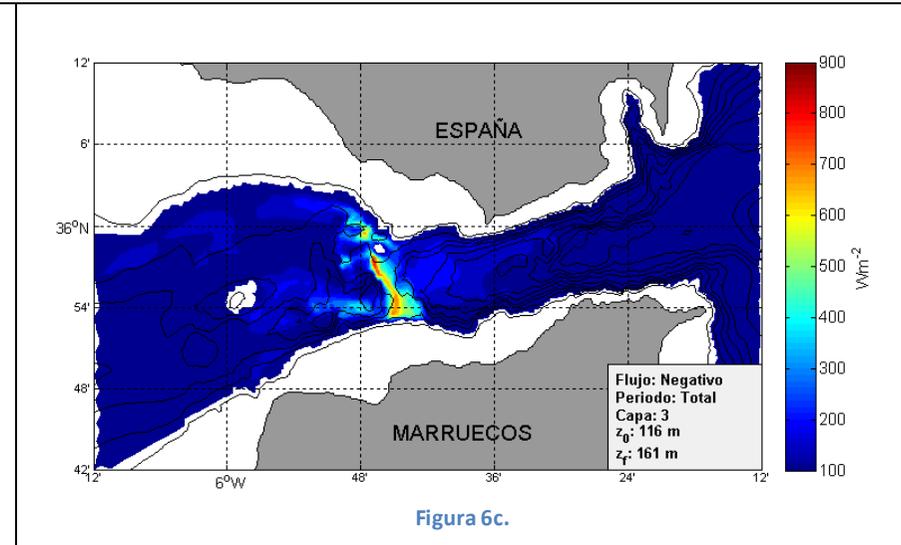


Figura 6c.

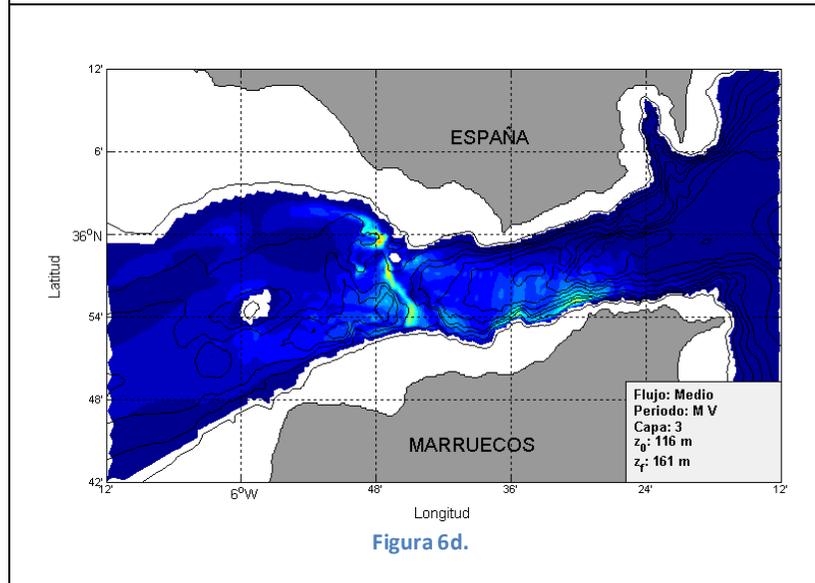


Figura 6d.

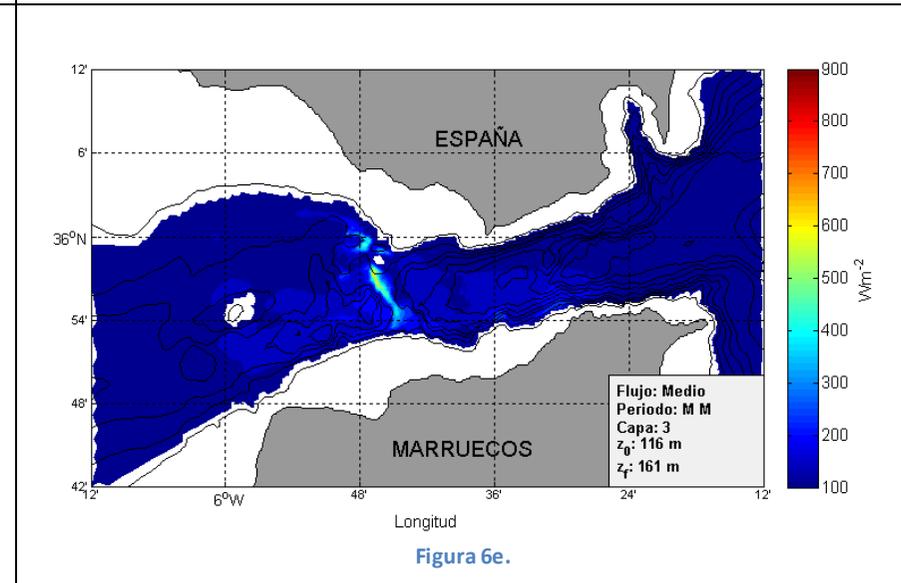


Figura 6e.

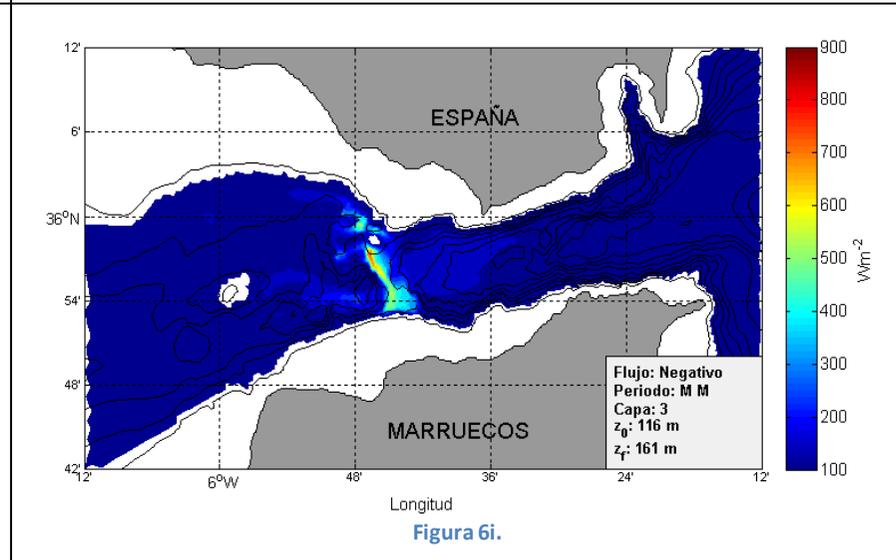
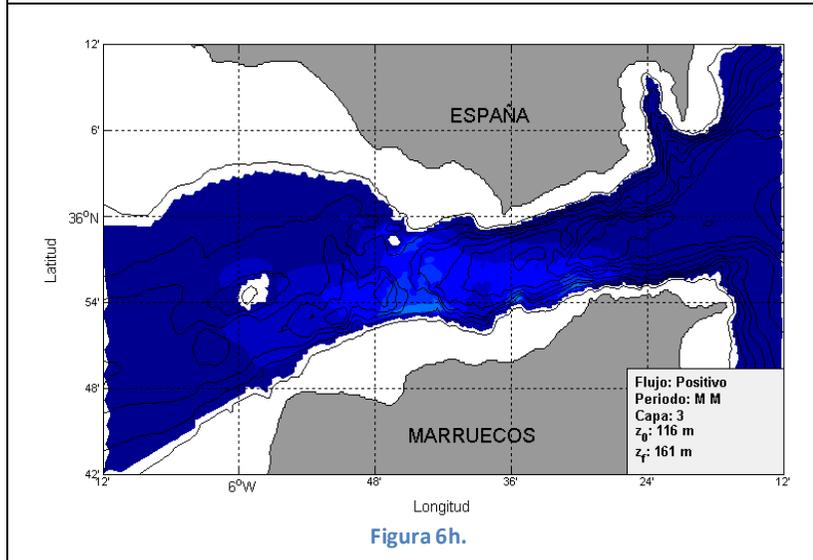
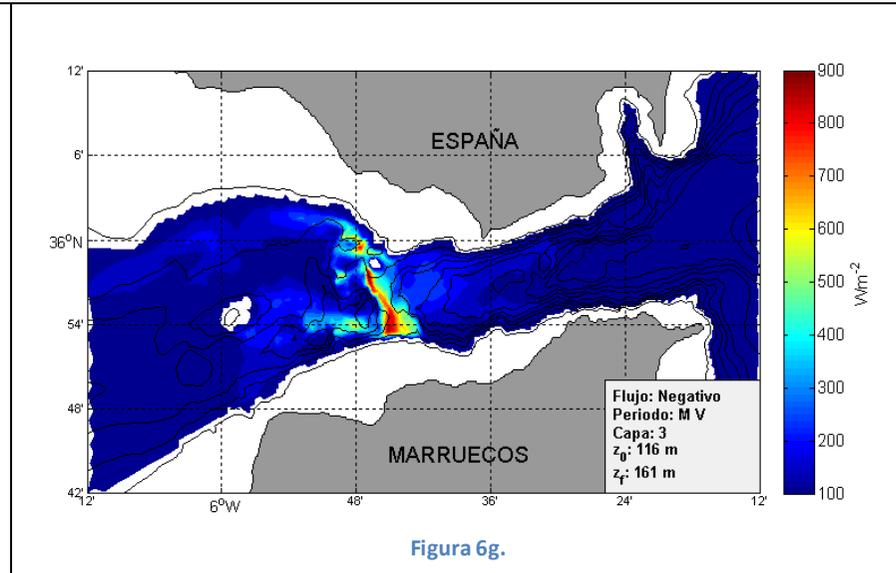
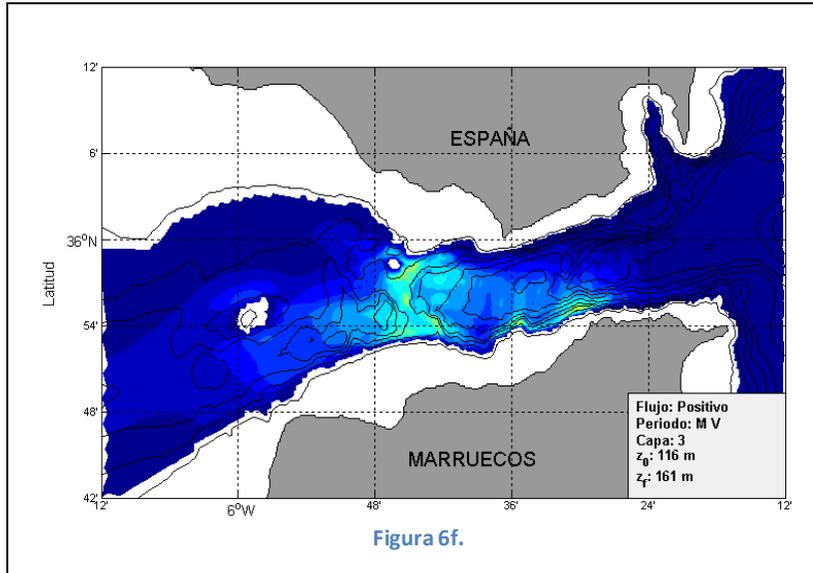




Figura 7.- Mismo que figura 4 para la capa 4.

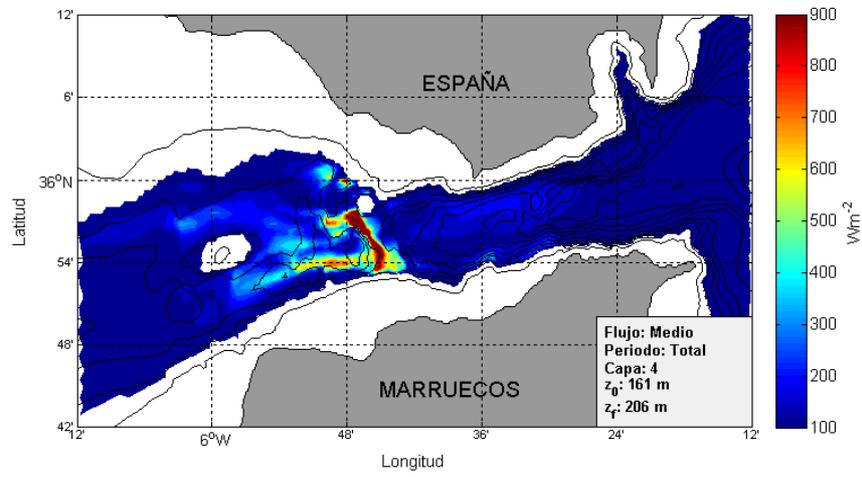
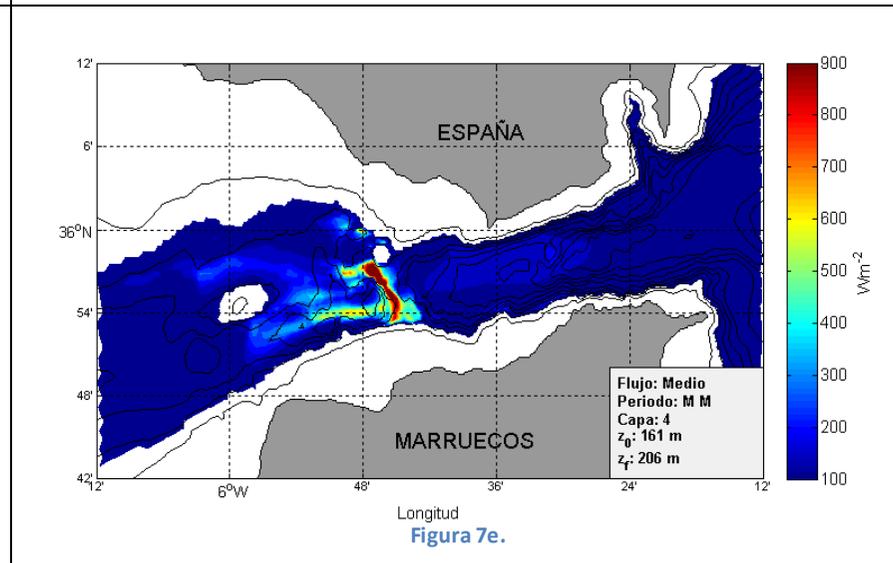
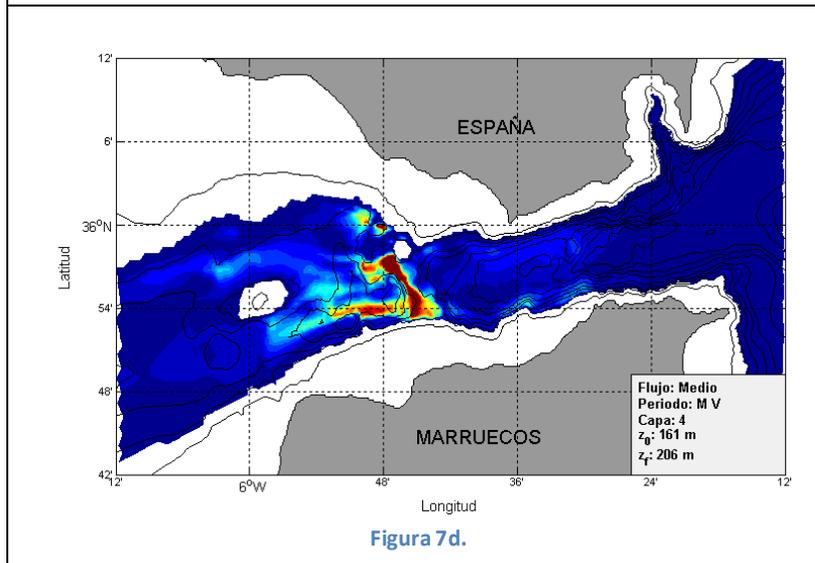
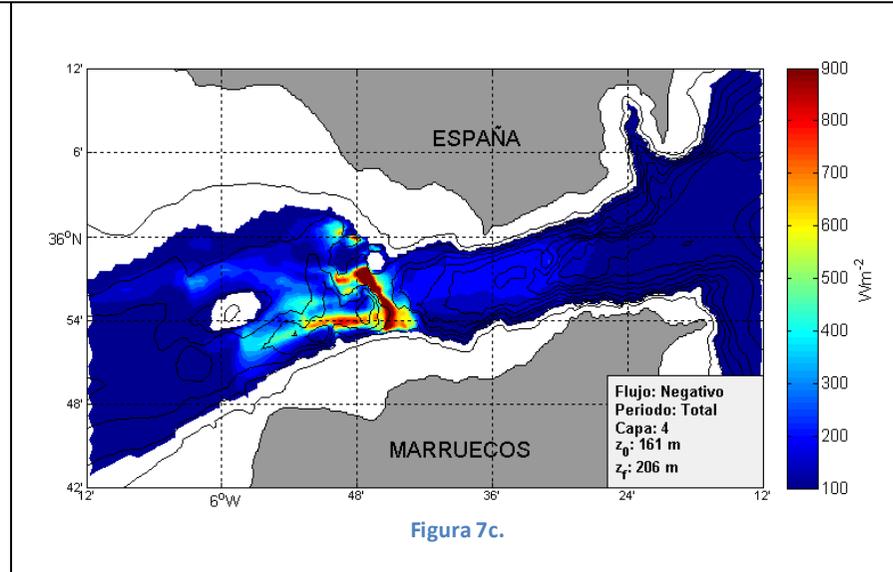
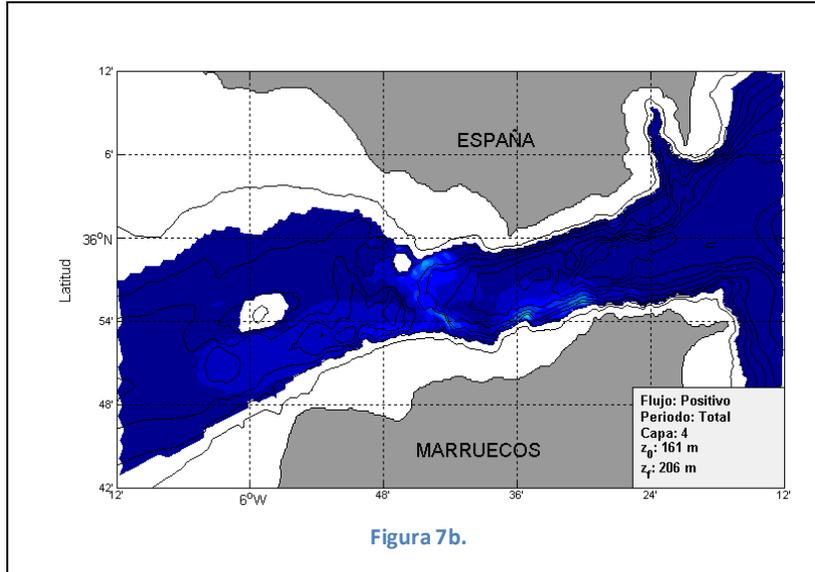


Figura 7a.



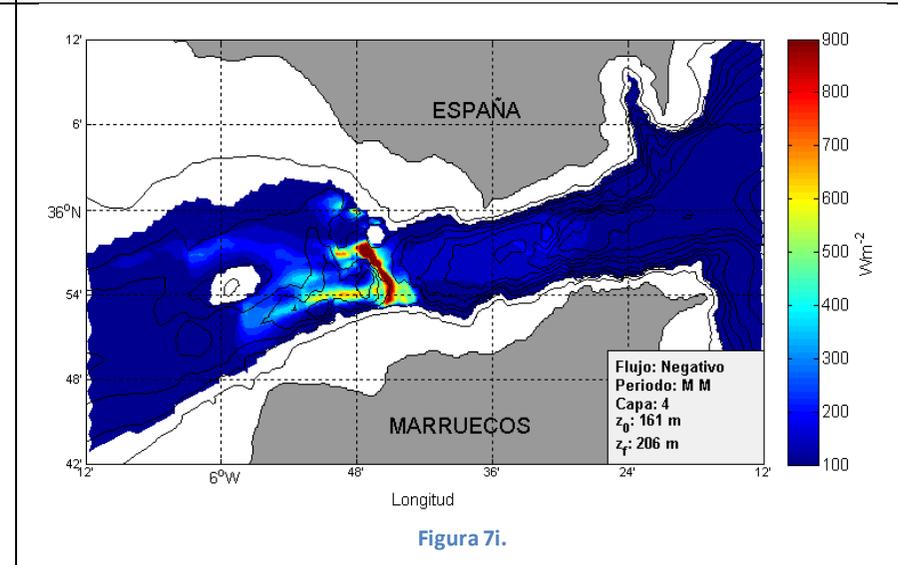
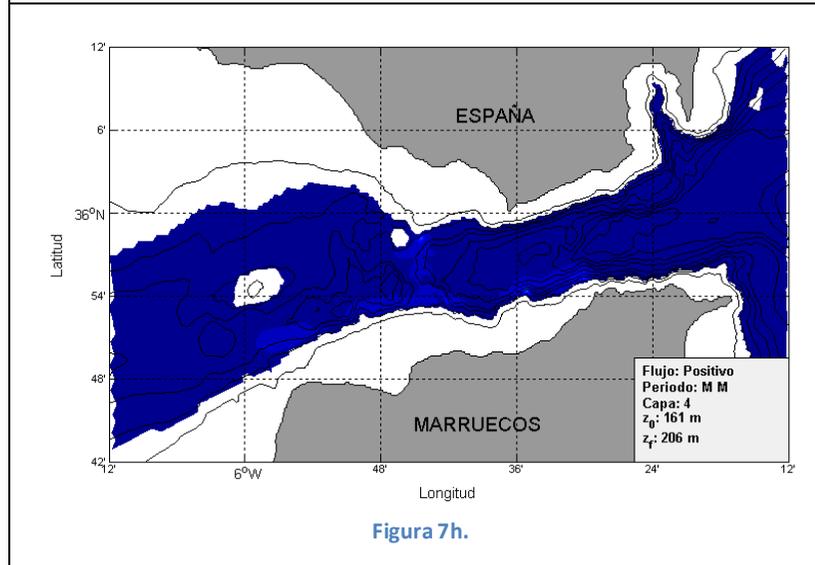
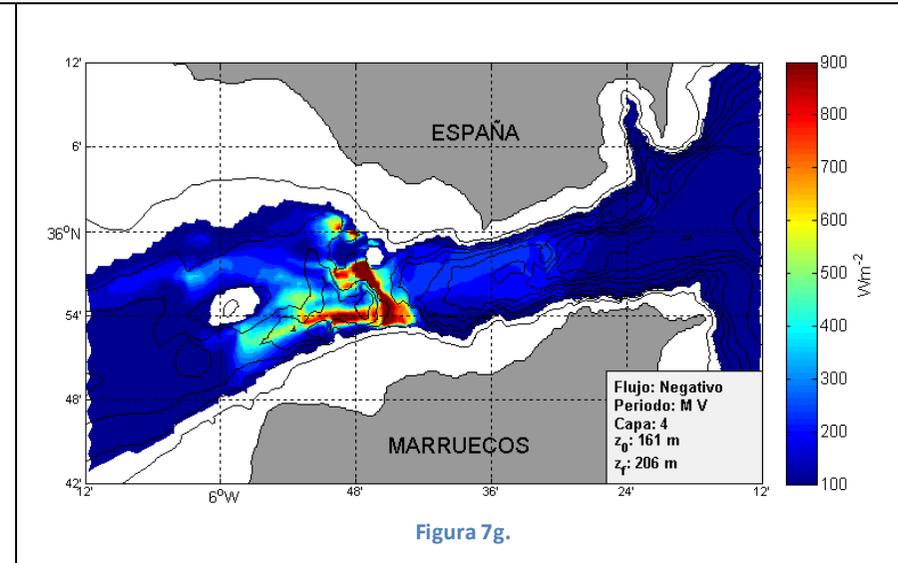
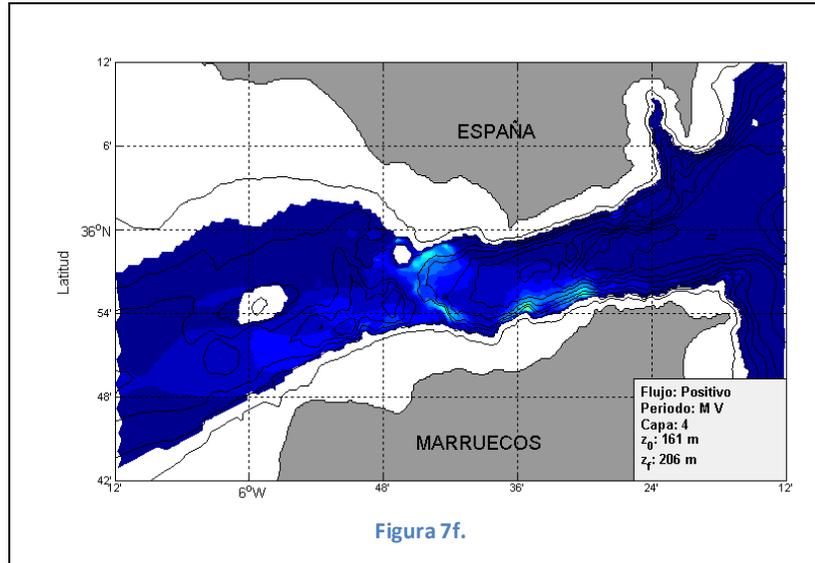




Figura 8.- Mismo que figura 4 para la capa 5.

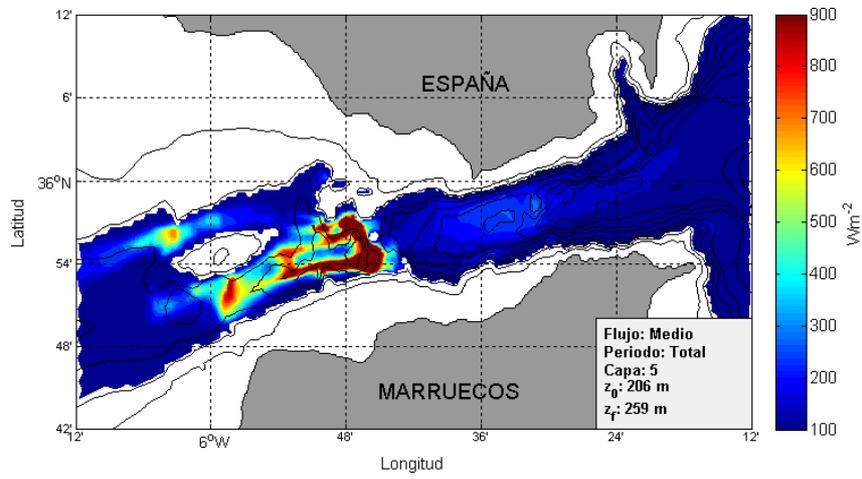
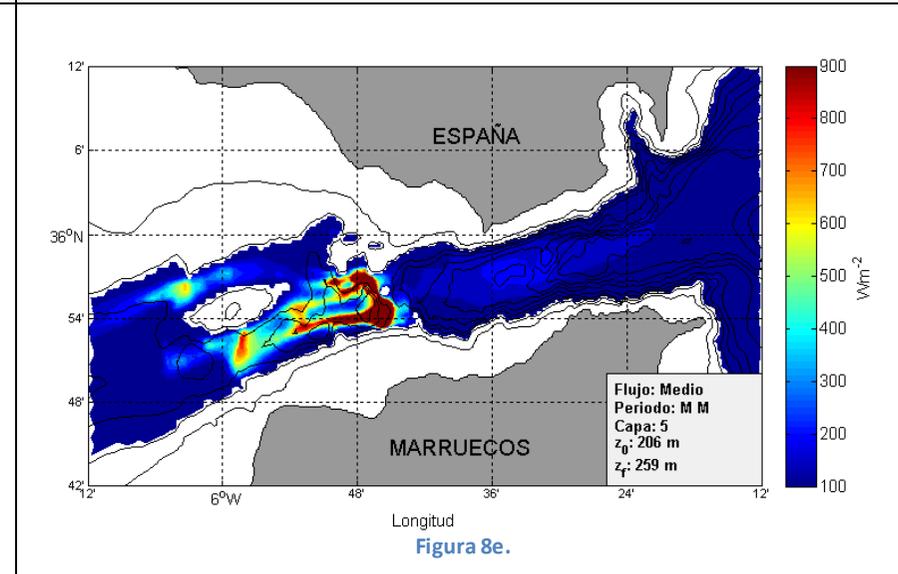
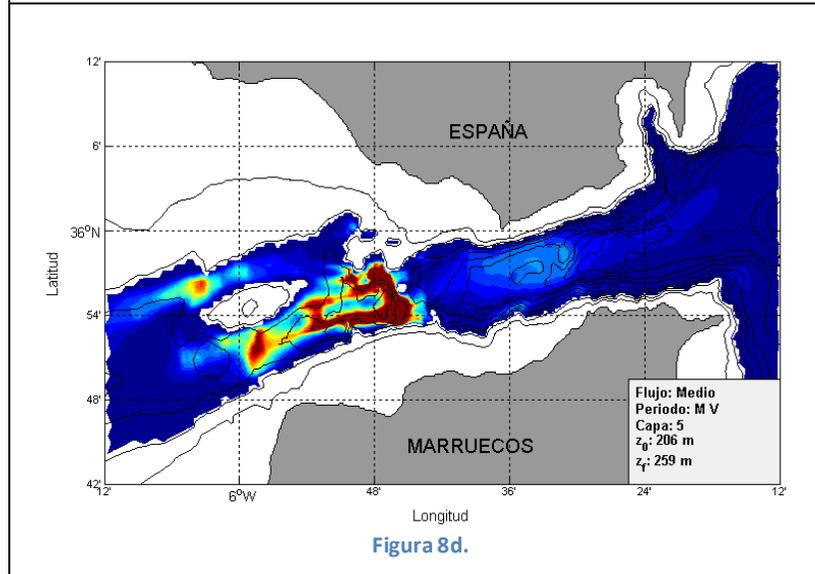
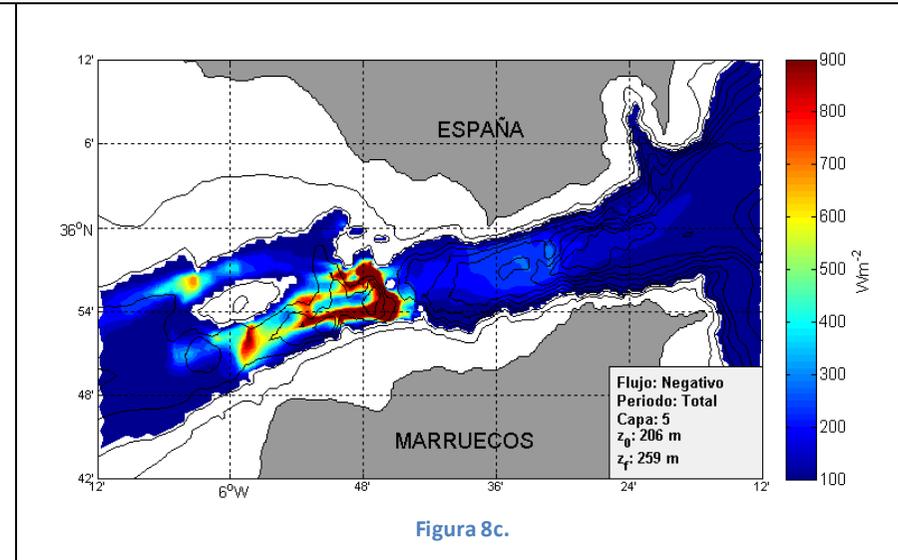
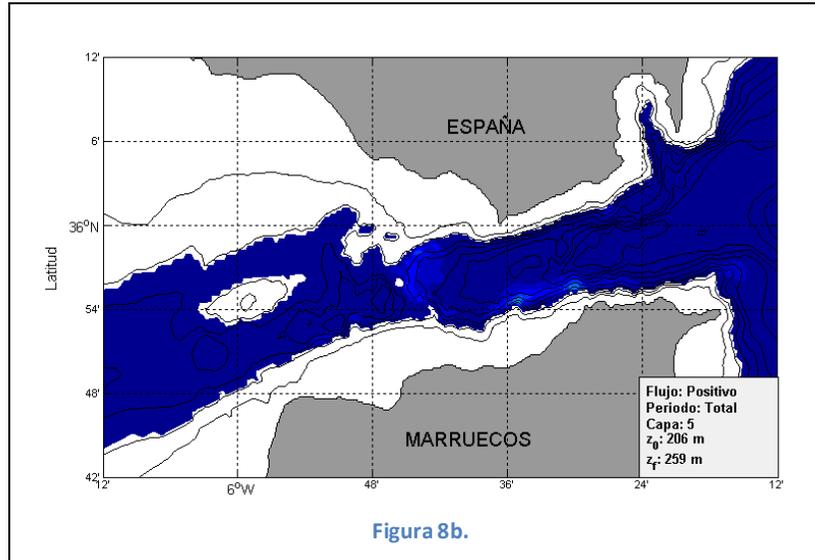


Figura 8a.



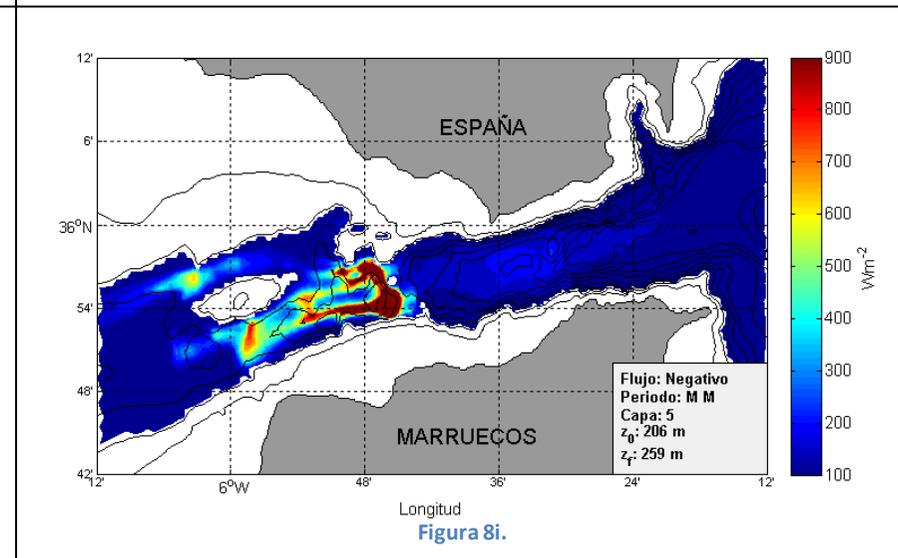
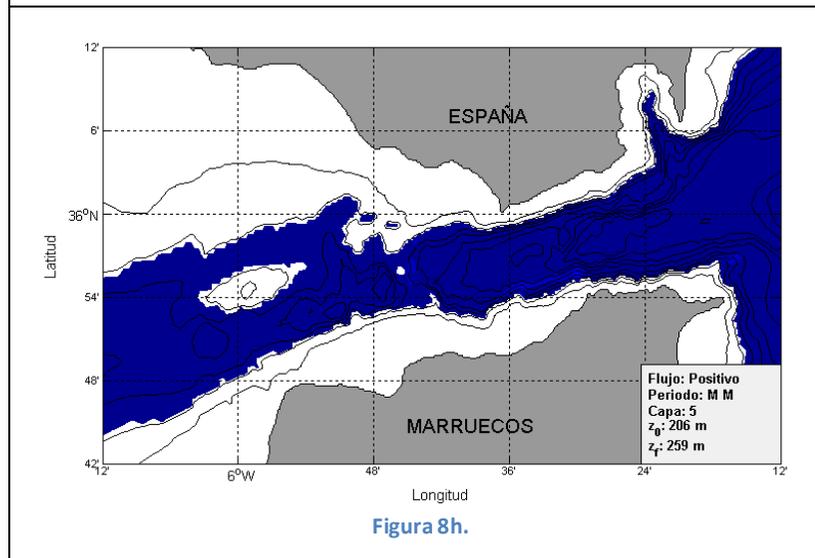
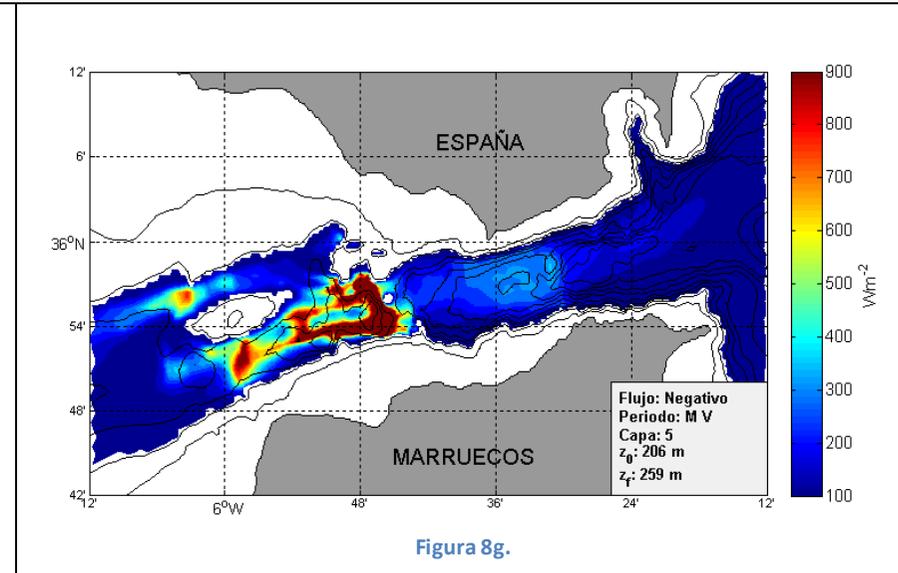
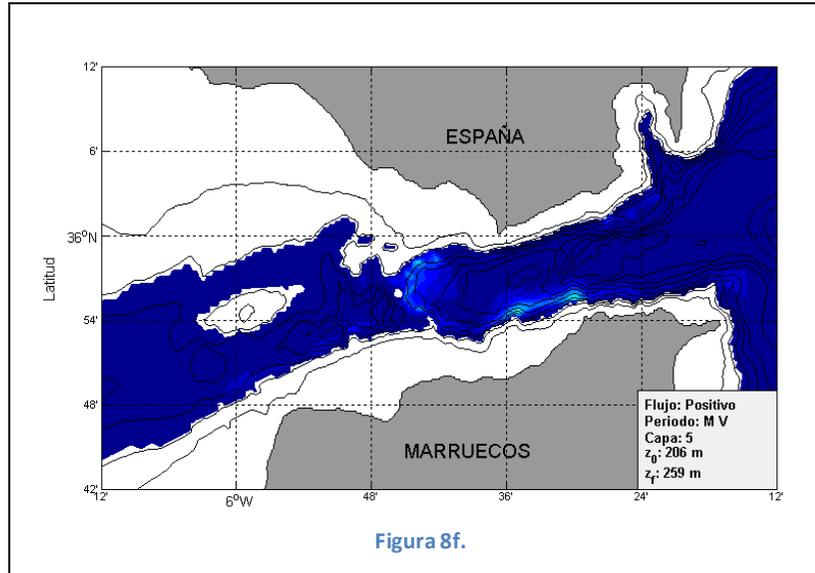




Figura 9.- Mismo que figura 4 para la capa 6.

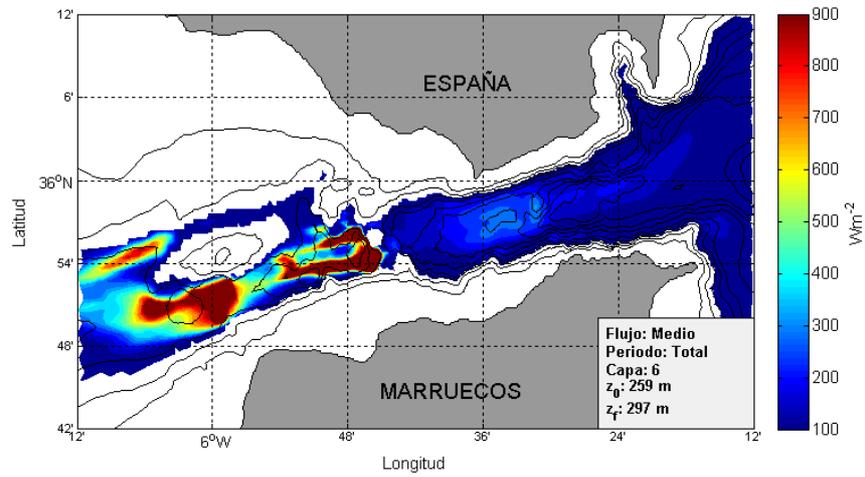
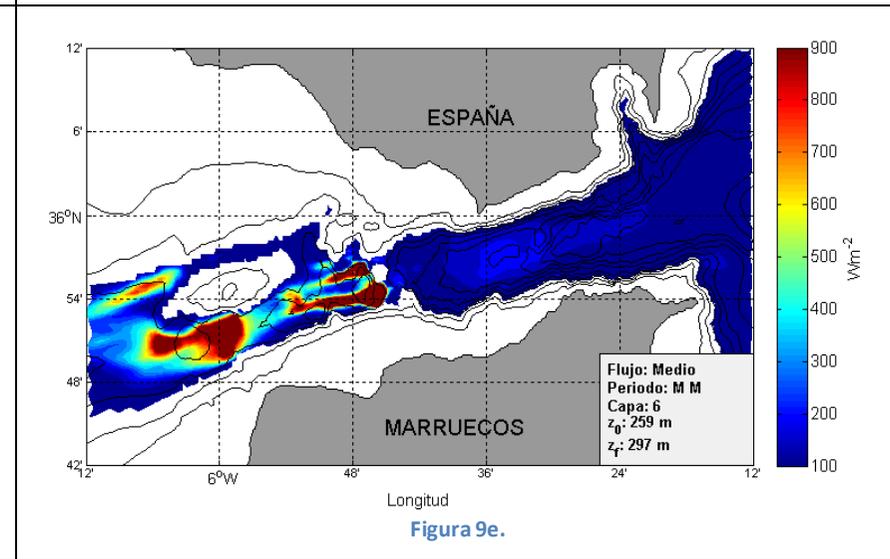
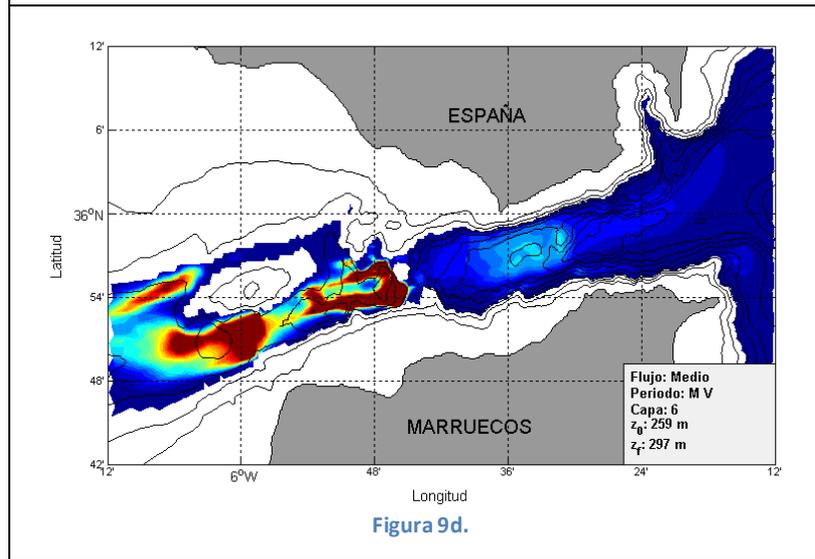
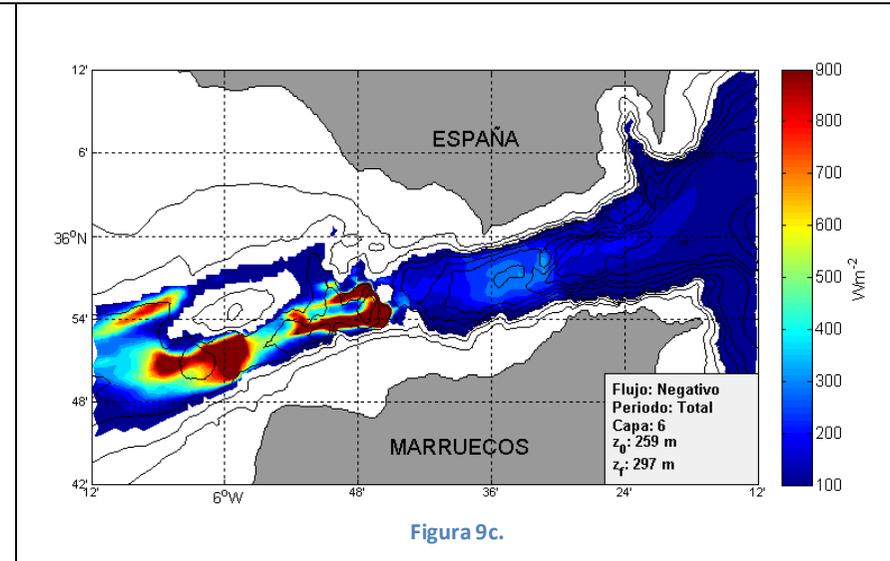
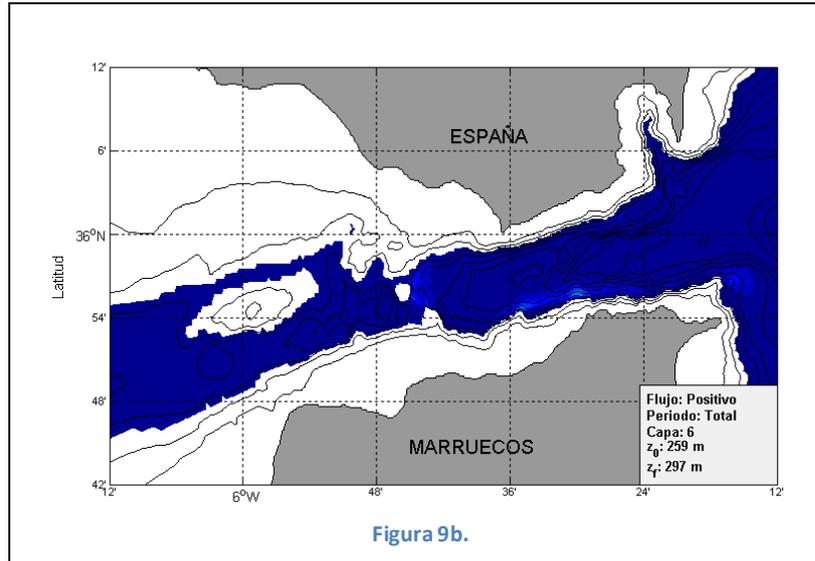


Figura 9a.



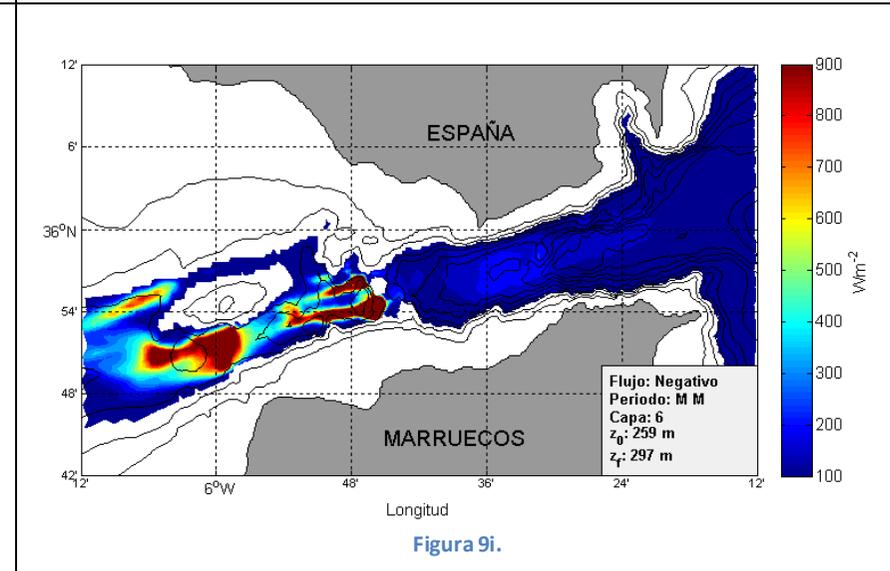
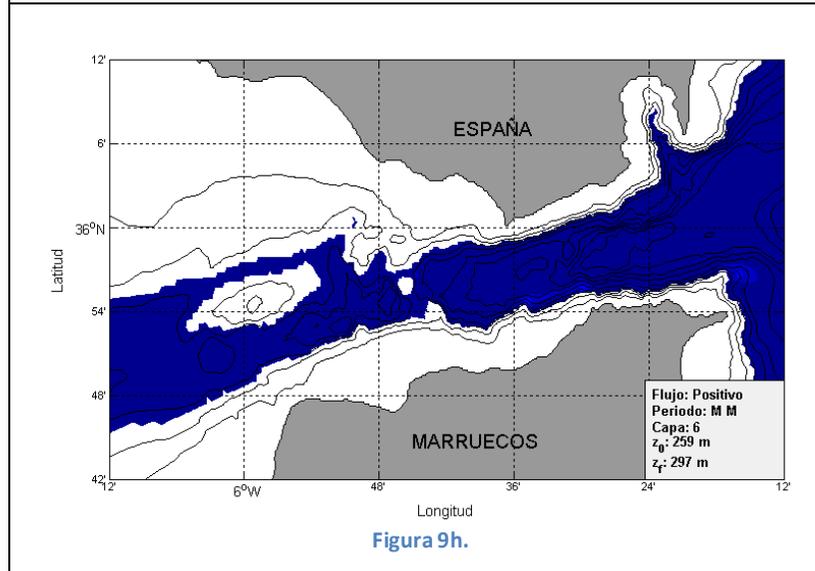
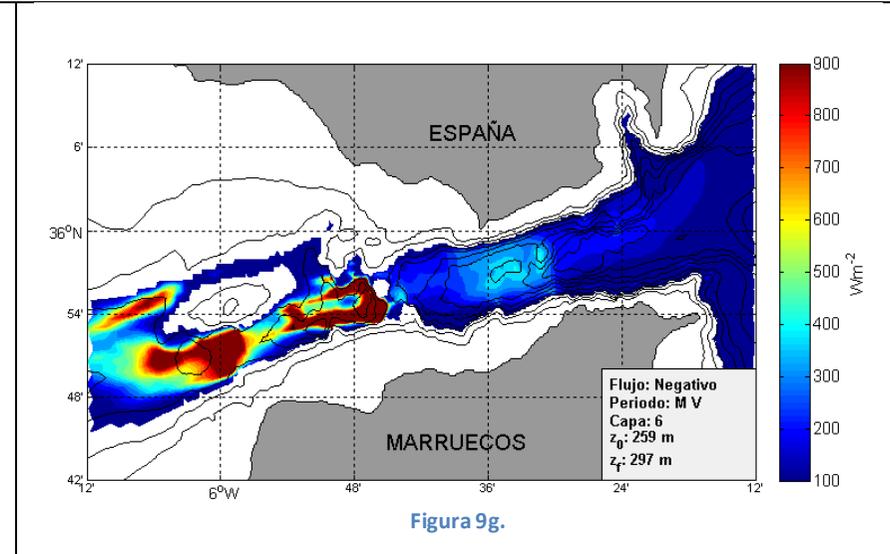
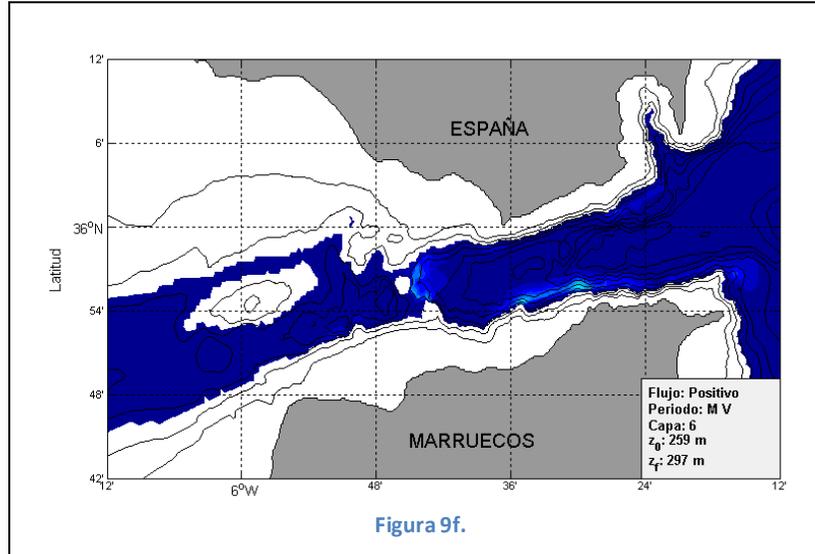




Figura 10.- Mismo que figura 4 para la capa 7.

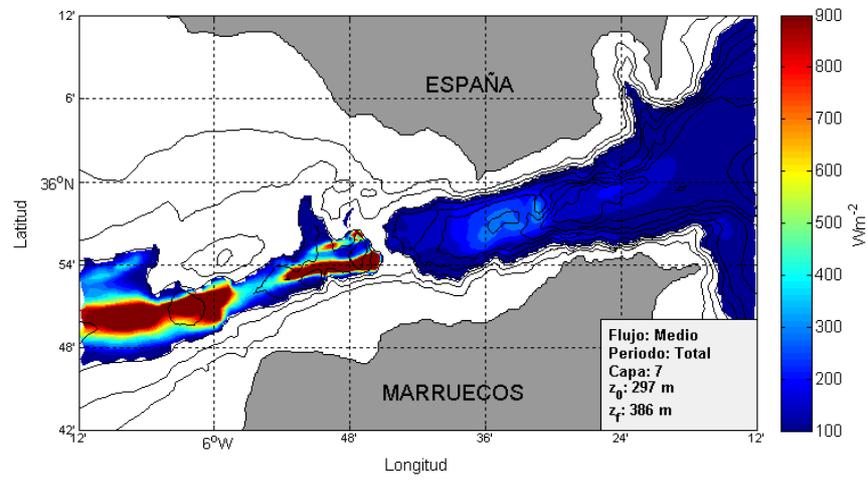
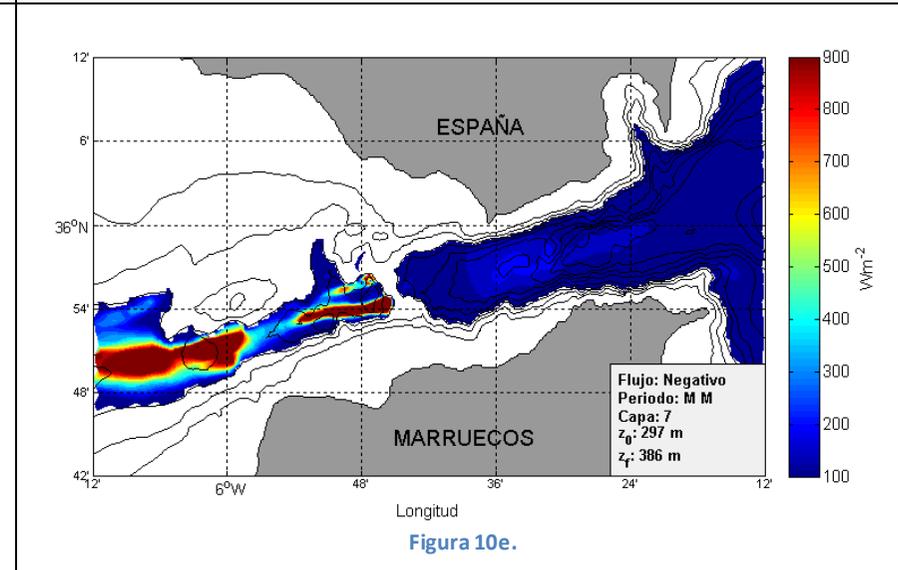
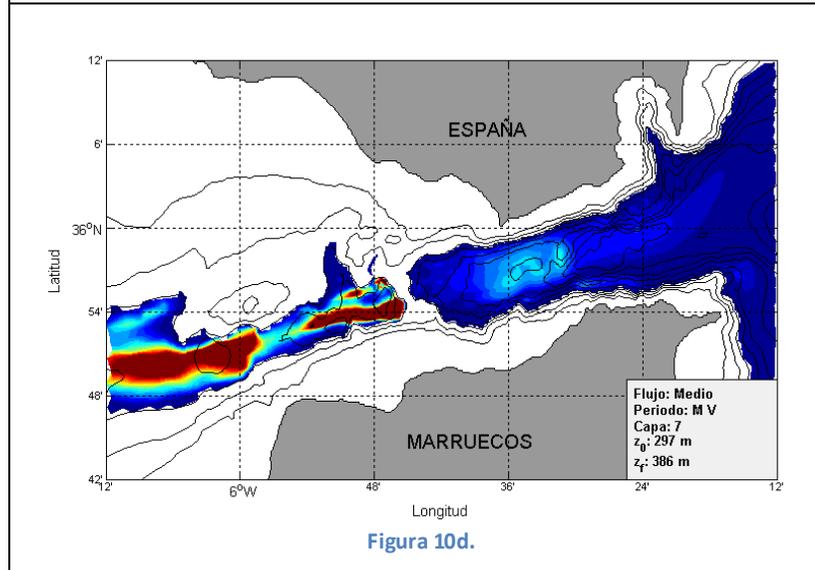
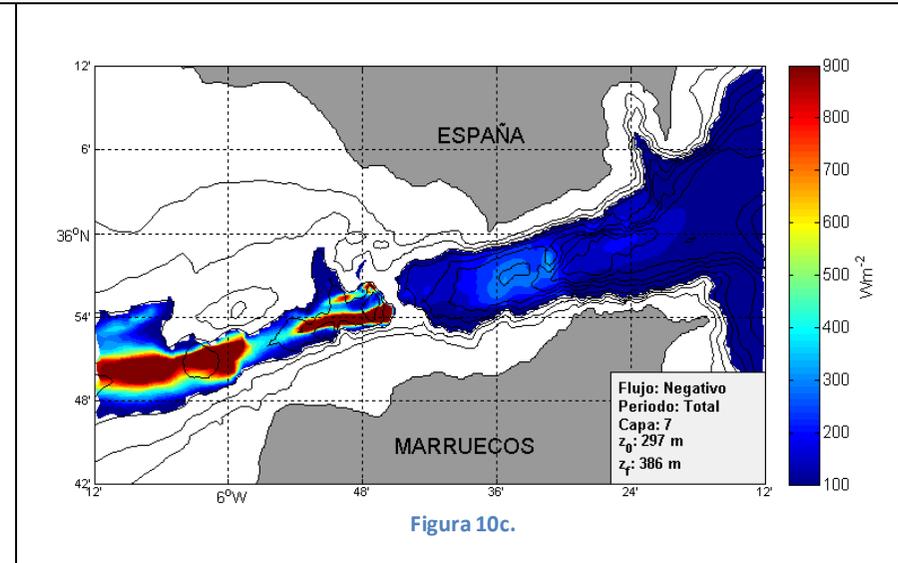
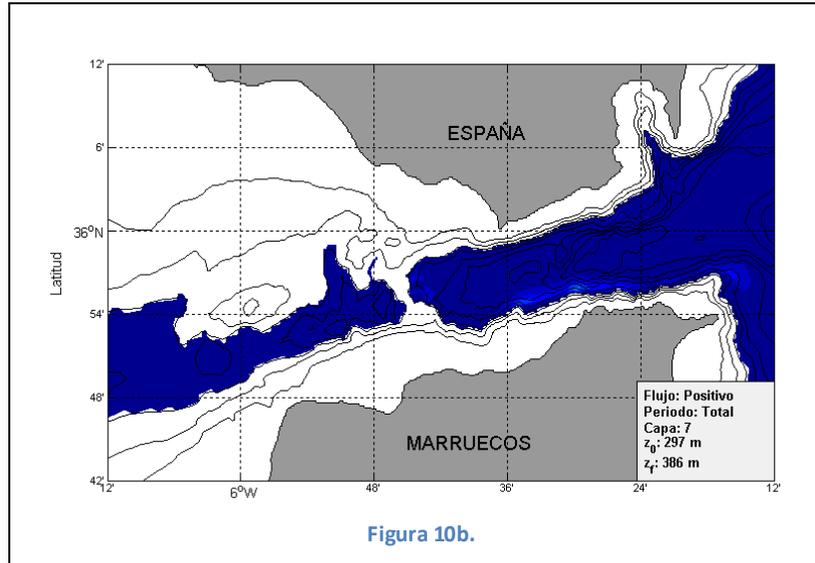


Figura 10a.



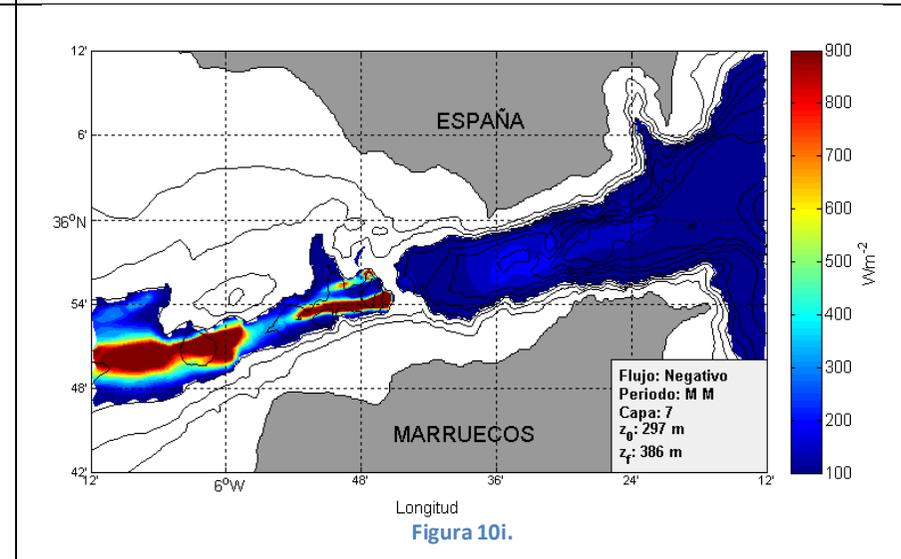
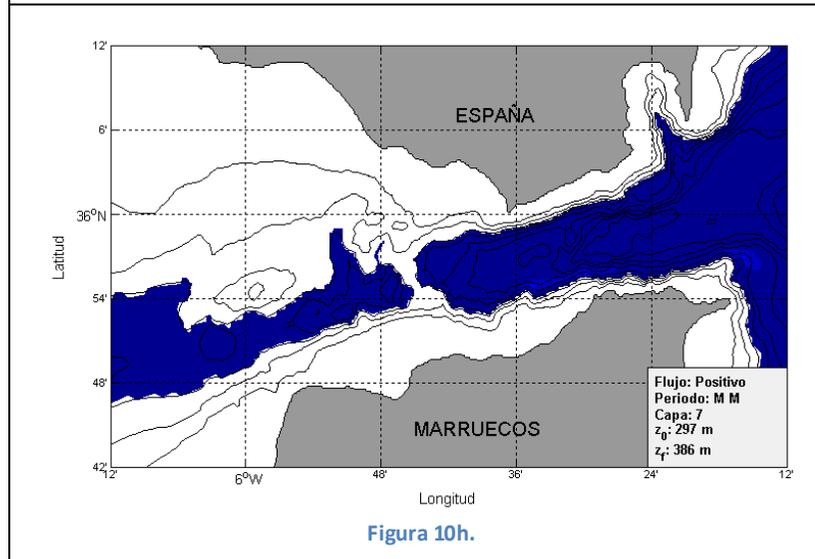
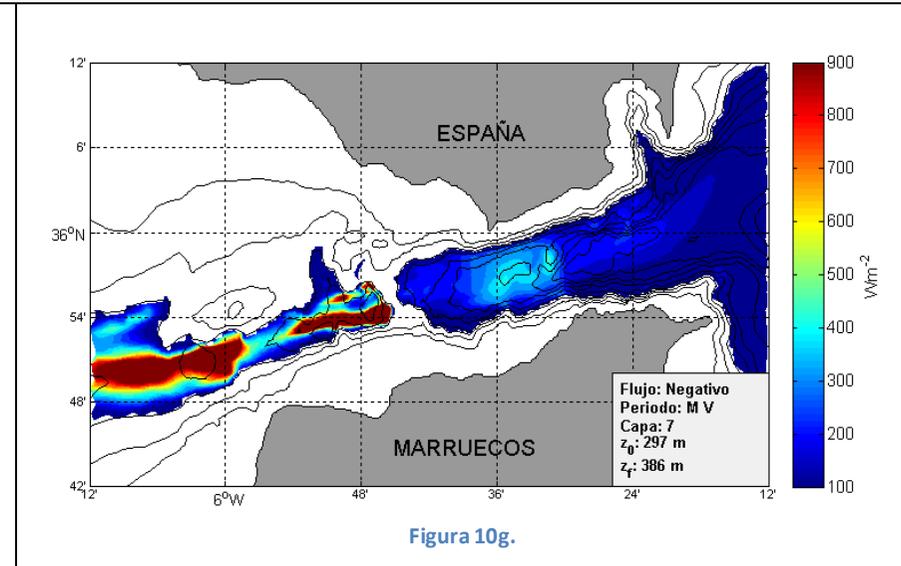
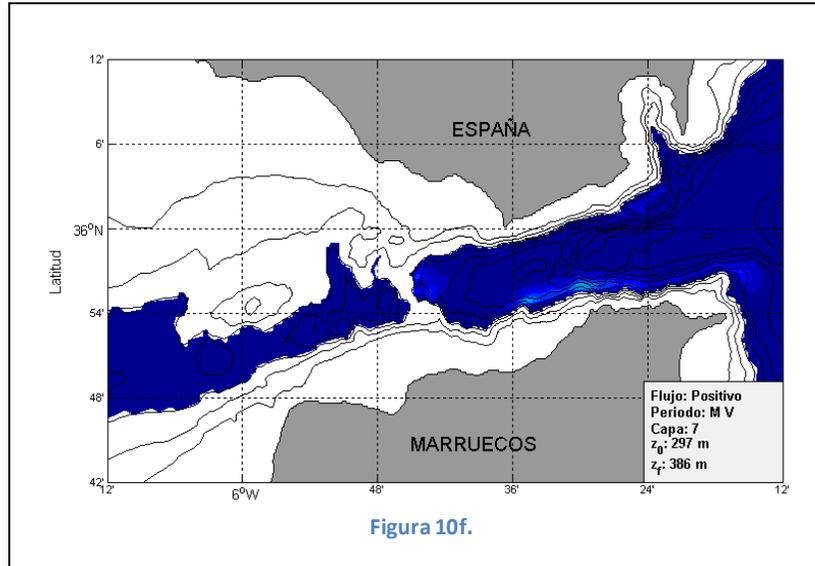




Figura 11.- Mismo que figura 4 para la capa 8.

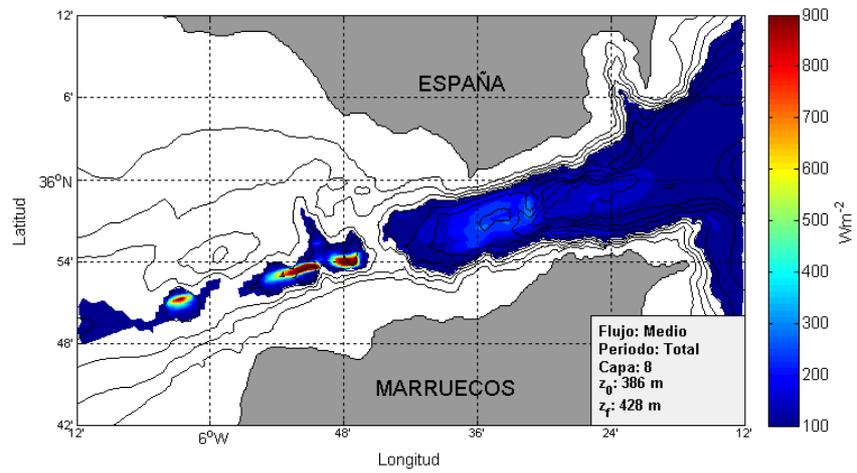


Figura 11a.



4.- Otros indicadores.

4.1.- Definición y cálculo de indicadores.

Mediante la descripción de los flujos de energía se obtiene información del promedio en intensidad durante un intervalo de tiempo considerado que en este trabajo se ha centrado sobre periodos de mareas vivas y mareas muertas, lo que da idea del rango en el que se mueven los flujos de energía. Sin embargo estos flujos de energía, que sólo tienen en cuenta la intensidad de las corrientes en un intervalo dado, no aportan toda la información para determinar la rentabilidad o no en la extracción de energía. A esto hay que añadir que existen diferentes dispositivos en el mercado que funcionan bajo condiciones específicas, o de prototipos aún en vías de desarrollo, los cuales, con mayor información puede motivar su adaptación a las características de las corrientes oceánicas de una zona a explotar como puede ser el diámetro del rotor, soporte, orientación, etc.

Es, por ejemplo, interesante conocer la duración de la corriente por encima de cierto umbral de intensidad. Puede ser necesario encontrar valores de velocidad suficientemente altos que permitan el arranque de los dispositivos y, sin embargo, que trabajen la mayor parte del tiempo con una intensidad menor pero suficiente como para que sea rentable la extracción de energía. Por otro lado, el Estrecho de Gibraltar es un ejemplo típico de sistema de intercambio bicapa con aguas de origen atlántico que entran por superficie y aguas del Mediterráneo que escapan a contracorriente en profundidad. El estado de marea puede invertir el sentido del flujo y esto puede afectar al funcionamiento de algunos dispositivos. A su vez, un flujo que no mantenga la misma dirección dificulta la extracción de energía de las corrientes en la mayoría de los dispositivos. También puede afectar a la rentabilidad y a la vida media del dispositivo el hecho de que a diferente altura se vea sometido a tensiones provocadas por diferencias notables entre las velocidades en el perfil vertical de la columna de agua (cizalla vertical de la corriente).

Se definen los indicadores en este trabajo como unos índices con los que poder cuantificar las características de las corrientes oceánicas que tengan en cuenta los aspectos que hemos considerado. En los siguientes puntos se indica el procedimiento seguido para su definición y obtención. Estos indicadores se han calculado para todos los intervalos de tiempo t_0 señalados en el apartado 2.2 aunque, para no saturar con un exceso de información este informe, se ha optado por incluir solamente un caso representativo de cada capa.

· **Porcentaje de duración de la corriente por encima de un umbral de intensidad (PDCEUI).**

Se cuantifica la duración de las corrientes por encima de un cierto valor umbral de intensidad como un porcentaje en el tiempo (PDCEUI). El valor umbral del flujo de energía del cual debe mantenerse en el tiempo para hablar de condiciones de rentabilidad que se ha considerado en este informe es de 200 Wm^{-2} que se corresponde con una velocidad de corriente de 0.73 m/s . En primer lugar calculamos el flujo en cada punto y almacenamos aquellos puntos de la matriz en los



que el flujo es mayor del valor umbral mediante una matriz lógica que deja un 1 en el elemento de la matriz que cumple con esa condición y 0 en los que no se cumple. Recordemos que tenemos una matriz de flujo para cada instante. Por tanto, sumando todas estas matrices lógicas, dividiendo por el número total de datos y multiplicando por 100 cada elemento resulta un porcentaje que posteriormente representamos en una sección horizontal. Mencionaremos aquí que el número total de datos (y por tanto, número de matrices) durante el periodo total de tiempo es de unos 2189 y para cada uno de los casos de mareas vivas y mareas muertas es de 541.

· **Porcentaje de duración del sentido de la corriente (PPSC).**

El porcentaje umbral es un indicador que da una idea acerca de la permanencia de la intensidad de los flujos. Pero también es necesario conocer cuál es la permanencia del sentido del flujo puesto que el forzamiento mareal invierte el sentido y no todos los dispositivos de extracción de energía operan en ambos casos. Para cuantificar la permanencia de la corriente se calcula, análogamente al caso anterior, un porcentaje en el tiempo durante el cual el signo de la corriente no cambia. El signo positivo indica corriente entrante al Mediterráneo y el signo negativo lo contrario. Se almacenan los elementos de la matriz de velocidad que tiene el mismo signo mediante una matriz lógica, se suman todas las matrices y se divide por el número total de datos de forma similar a como se hizo con el PDCEUI.

· **Porcentaje de permanencia de la orientación de la corriente (PPOC).**

Es un indicador similar al anterior aunque sensiblemente más restrictivo: se evalúa el tiempo durante el cual el flujo mantiene la misma orientación. Ésta se deduce de las componentes u y v de la velocidad en cada punto de malla según

$$\theta = \text{atan}\left(\frac{v}{u}\right) \quad (8)$$

donde $\theta = 0^\circ$ indica velocidad hacia el Este, 90° hacia el Norte, etc.

Existen dos direcciones preferentes en el Estrecho de Gibraltar como consecuencia de la estructura bicapa. Una de ellas se corresponde con el agua atlántica entrante al Mediterráneo que sigue la orientación del eje del Estrecho, que es de unos $10^\circ - 15^\circ$ (con el ángulo de 0° señalando el este), mientras que la segunda se corresponde con el flujo saliente del Mediterráneo hacia el Atlántico el cual sigue la dirección de 195° . Por tanto, para realizar un estudio de la permanencia en la orientación de las corrientes se ha optado por estudiar la variabilidad de la dirección de las corrientes en cada punto de malla con respecto a esas direcciones privilegiadas con $\pm 15^\circ$. Se ha tomado este margen de permisividad por razones de operatividad de los dispositivos de extracción de energía puesto que deben orientarse encarando la corriente y su efectividad disminuye considerablemente si la dirección de la corriente incidente varía con un margen mayor al considerado.



Se han obtenido dos porcentajes para cada capa, uno para las velocidades con orientación comprendida en el intervalo de $[355^\circ, 25^\circ]$ y un segundo, análogo al anterior, para el intervalo $[180^\circ, 210^\circ]$. Matemáticamente queda descrito por las ecuaciones

$$b_1 = [\theta_{355 \rightarrow 360}, \theta_{0 \rightarrow 25}], \quad b_2 = [\theta_{180 \rightarrow 210}]$$
$$PPOC_1 = \frac{\sum_{355}^{25} fr(\theta)}{N} 100, \quad PPOC_2 = \frac{\sum_{180}^{210} fr(\theta)}{N} 100 \quad (9a), (9b)$$

donde $PPOC_1$ es el porcentaje de permanencia de orientación de las corrientes en la dirección de 10° y $PPOC_2$ en la dirección de 195° . N es el número total de datos y fr es la frecuencia de cada orientación. La frecuencia relativa se ha obtenido calculando previamente las series temporales de u y v y, a partir de ellas, la serie temporal de ángulos para cada punto de malla. El intervalo b_1 se ha dividido en dos subintervalos para solucionar el problema de la discontinuidad en 0° - 360° . Finalmente se calcula una media vertical de los porcentajes representativa de cada capa para su posterior representación.

En las capas superficiales y en la región del estrechamiento de Tarifa, se espera encontrar un $PPOC_1$ elevado, próximo al 100%, debido a que no llega a desbordarse este control hidráulico, mientras que, por el contrario, $PPOC_2$ será mucho menor. A más profundidad, donde el flujo negativo es más intenso, tiene lugar el efecto opuesto y el $PPOC_2$ será de, aproximadamente, el 100% puesto que en este lugar tampoco se produce desbordamiento del control.

· Cizalla máxima.

La vida media de cualquier dispositivo de extracción de energía y, especialmente, de una turbina de eje horizontal, será tanto mayor cuantas menos vibraciones tenga que soportar el rotor. Entre las causas que pueden originar tales vibraciones se encuentra el hecho de que la velocidad de corriente varíe con la profundidad, es decir, diferencias sustanciales de velocidad que pueden presentarse a lo largo del aspa del aerogenerador. La forma de caracterizarlo es calculando la cizalla vertical.

Se define la cizalla vertical mediante la siguiente expresión matemática

$$c = \frac{\partial V}{\partial z} \quad (10)$$

donde V es la velocidad y z la profundidad. La cizalla mide la variación de la velocidad horizontal entre dos profundidades determinadas. En el caso que nos interesa, nos va a servir para conocer las tensiones a las que puede verse sometido cualquier dispositivo de extracción de energía a diferente altura.

Por las razones dadas, la velocidad V en la ecuación (10) se reemplaza por la componente dominante u . La forma de cuantificar estas tensiones es calculando la cizalla entre todos los niveles que existen dentro de una misma capa en valor absoluto.



$$c = \frac{\Delta u}{\Delta z} = \left| \frac{u_f - u_0}{z_f - z_0} \right| \quad (s^{-1}) \quad (11)$$

aquí z_0 es el punto de malla vertical más superficial y z_f es el punto de malla vertical consecutivo. Análogamente, u_0 es la velocidad de la corriente en z_0 y u_f es la velocidad de la corriente en z_f . A continuación, se obtiene la cizalla máxima de cada capa y se almacena con el objetivo de calcular la media temporal de cizallas máximas. Como ejemplo, expondremos el caso de la capa 1 la cual está formada por 7 puntos de malla verticales (ver tabla 1). Se calcula una cizalla entre cada dos niveles según la ecuación (10), un total de 6 cizallas, y se almacena el valor máximo de todas ellas. Calculamos la media temporal de las cizallas máximas y el resultado se representa en una sección horizontal.

• Mapas de ruido.

La palabra ruido puede tener diferentes interpretaciones según el contexto en el que se enmarca, en consecuencia, es importante aclarar a qué se llama ruido en este trabajo. Para ello, vamos a introducir previamente algunos conceptos teóricos.

La velocidad instantánea de las corrientes se puede descomponer en suma de una velocidad “media” (lentamente variable, en realidad) debida a forzamientos estacionarios o de escala temporal grande más una velocidad fluctuante debida a fenómenos de escala temporal muy corta y a otros de naturaleza aleatoria. Es decir:

$$v = \langle v \rangle + v' \quad (12)$$

donde v es la velocidad instantánea, $\langle v \rangle$ es la velocidad “media” que resulta del conjunto de los fenómenos estacionarios y v' es la velocidad fluctuante. En la práctica, la expresión (12) se evalúa con ayuda de filtros numéricos de frecuencia de corte seleccionable. La serie de “paso baja” representa la contribución “media” $\langle v \rangle$ en tanto que la de paso alta es la fluctuante o “ruido”. De esta descomposición se deduce inmediatamente que la media temporal de v' es cero. Para evaluar la importancia de esta parte fluctuante se recurre al valor cuadrático medio cuya expresión matemática es la que aparece a continuación.

$$v_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^2} ; \quad (13)$$

En el Estrecho de Gibraltar, uno de los principales fenómenos que gobiernan el comportamiento de las corrientes son las mareas cuya dinámica es estacionaria (en realidad periódicamente estacionaria). Pero también tienen lugar otros fenómenos no asociados a la marea que ocurren de forma frecuente provocando el aumento o disminución de la velocidad, en ocasiones de forma considerable. Estos fenómenos pueden deberse a viento, vórtices y uno de los más importantes y el que nos interesa cuantificar en este trabajo es el de ondas internas (ver apéndice). Estas ondas pueden aumentar los picos de velocidad en más de 1 m/s y podrían ser aprovechables o no según



las características del dispositivo con el que se trabaje. Sin embargo, el hecho de que esa velocidad cambia en escalas de tiempo de minutos hace pensar que esos fenómenos son más perjudiciales que beneficiosos desde el punto de vista técnico, ya que estaría sometiendo al dispositivo a grandes tensiones y cambios de dirección de la corriente. Por esta razón se han catalogado como ruido.

Como se ha dicho, para separar ambas contribuciones, media y fluctuante, se lleva a cabo un filtrado. En concreto, un filtro de Gauss, con una frecuencia de corte apropiada que se ha considerado es la correspondiente a 2 h de periodo. Siguiendo con este último caso, la señal resultante se resta a la velocidad instantánea y así se obtiene la señal de alta frecuencia v' o "ruido" a la que se calcula el valor cuadrático medio como indica la ecuación (13). Para representarlo, en lugar de calcular una media vertical del valor cuadrático medio como se ha hecho en otros indicadores, se ha optado por calcular la media vertical de u y v de cada capa previamente al filtrado pues se espera menos variabilidad de las velocidades dentro de cada capa que de la señal de alta frecuencia que, recordemos, es un valor fluctuante.

4.2.- Patrón espacial de los indicadores.

Las figuras 12 a 18 muestran algunos ejemplos representativos de la distribución espacial de los indicadores anteriores. Los paneles "a" de las figuras 12 a 15 muestran que los valores más altos del PDCEUI en las capas 1 a 4 sitúan en el umbral de Camarinal ya que sobre esta zona el flujo se acelera, y que disminuye notablemente a ambos lados del umbral. Al oeste, en la cuenca de Tánger, porque se acumula agua mediterránea en creciente y, por tanto, disminuye la energía cinética, mientras que al este el flujo entrante llega a acelerar debido al estrechamiento de la sección (figura 12a) pero el porcentaje no es mayor porque invierte el sentido del flujo en un número elevado de ocasiones. Por el contrario, para el flujo saliente, el porcentaje alcanza valores de más del 80% sobre el umbral de Espartel (figuras 17a y 18a).

Al estudiar la permanencia del sentido del flujo, paneles "b", se puede comprobar el comportamiento de estructura bicapa del Estrecho de modo que el PPSC de las figuras 12 y 13 toma valores próximos al 100% en la parte del Estrechamiento de Tarifa. Esta tendencia se atenúa considerablemente en la figura 14, capa 3, donde más o menos se sitúa la interfase entre el flujo entrante y el saliente. A partir de la capa 5 (figuras 16 a 18), el flujo de energía es sentido negativo la mayor parte de las ocasiones ya que nos encontramos en la capa mediterránea donde la corriente es preferentemente hacia el Oeste.

Las figuras que describen el PPOC₁ y PPOC₂ se corresponden con los paneles "c" y "d", respectivamente. La figura 12, panel "c", indica que el flujo entrante, además de ser permanente, mantiene la misma orientación, sin embargo, si atendemos a los paneles d, es a partir de la figura 16 (capas 5 a 7) donde se observa un PPOC₂ cercano al 100% sobre el umbral de Espartel cuando el flujo saliente escapa a través de él.



Flujos de energía en el Estrecho de Gibraltar. Proyecto FLEGER (RNM-3738).

Las figuras que pertenecen al bloque e tienen en cuenta el ruido y nuevamente encontramos diferencias entre las capas superficiales donde se desplaza el flujo entrante y las capas más profundas correspondientes al flujo saliente. En las figuras 12, 13 y 14 los fenómenos de alta frecuencia que hemos definido como ruido se observan desde Camarinal hacia el este como consecuencia de la liberación del solitón cuando se desborda el umbral de Camarinal. En profundidad, figuras 15 a 18, la presencia de fenómenos de alta frecuencia se localizan en la cuenca de Tánger, lo que indica que este tipo de ruido está vinculado espacialmente a la región de corrientes más intensas o donde hay transiciones hidráulicas.

Los lugares en los que se observan los valores más elevados de cizalla vertical (bloque f) es en la figura 12 en los bordes de ambos taludes, español y marroquí. También toma valores significativos, especialmente en las figuras 16, 17 y 18 situados, más o menos, alrededor del Banco Majuán. Este patrón espacial indica claramente que la cizalla vertical es el resultado de la fricción con el fondo fundamentalmente.

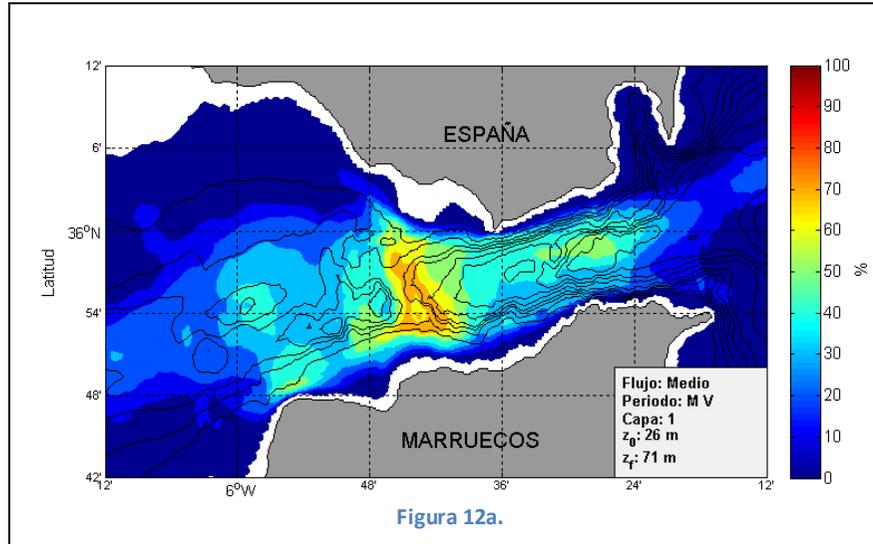


Figura 12a.

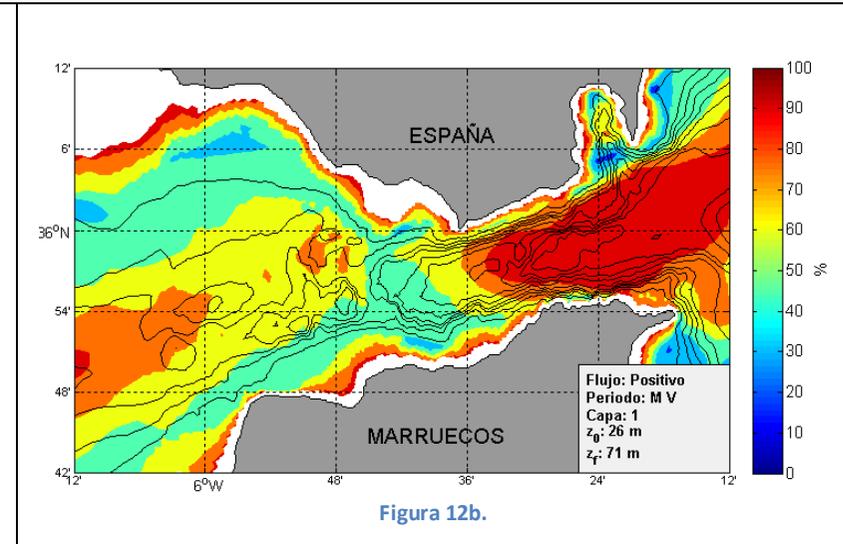


Figura 12b.

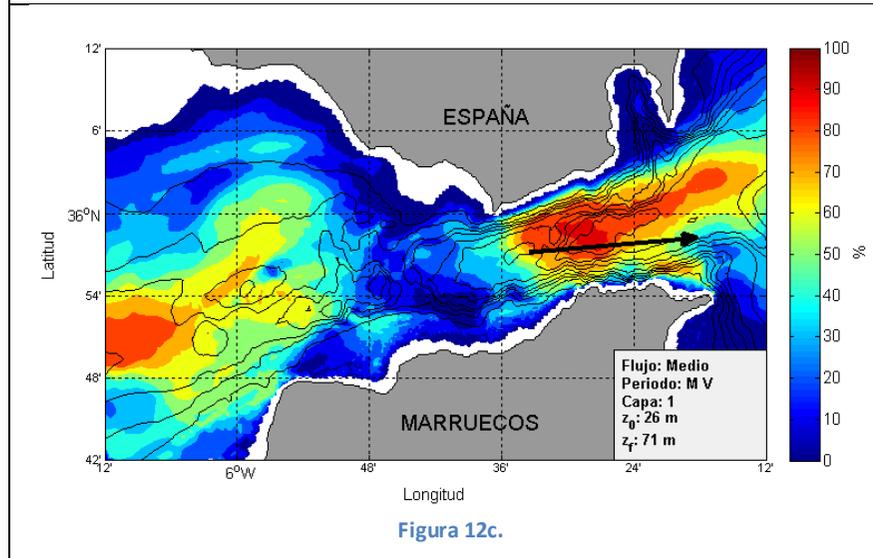


Figura 12c.

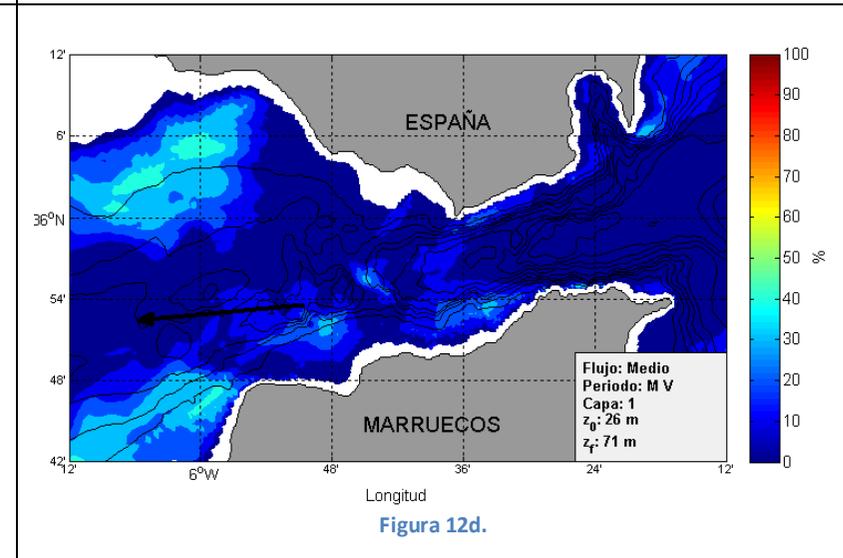


Figura 12d.

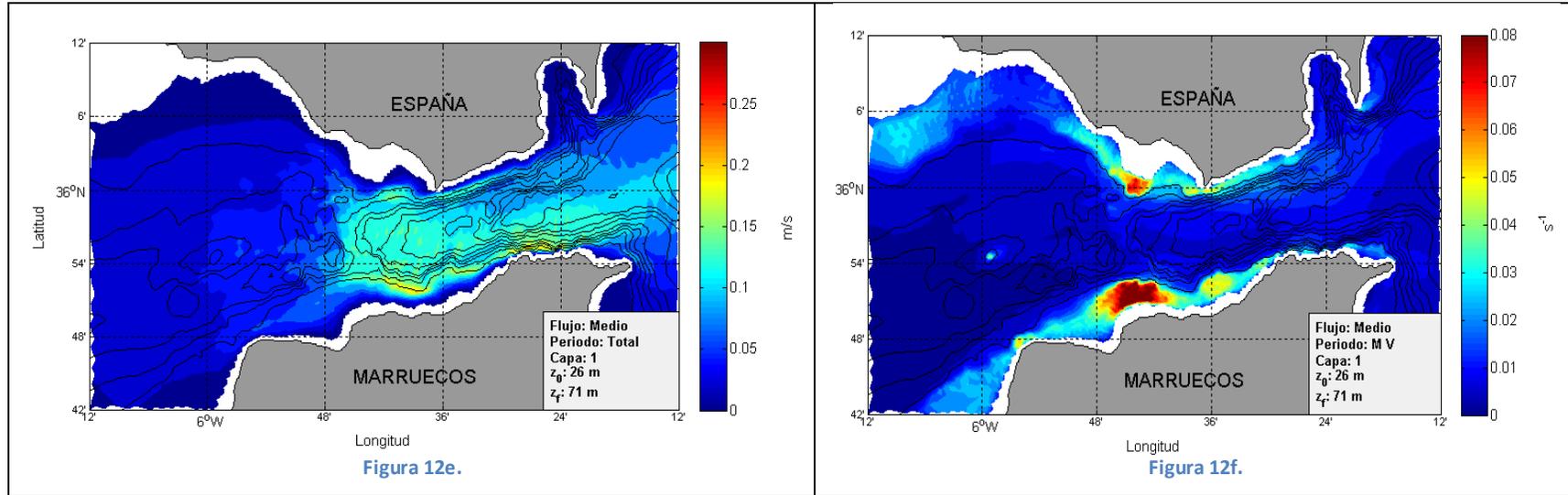
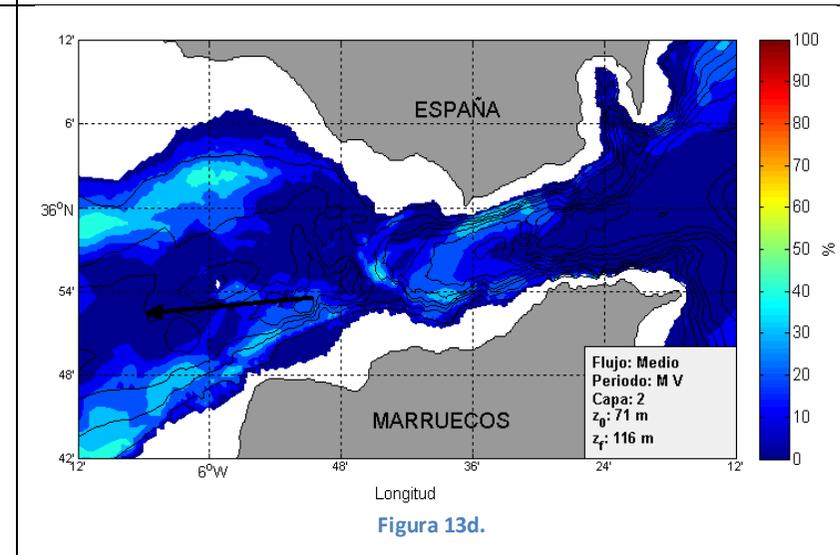
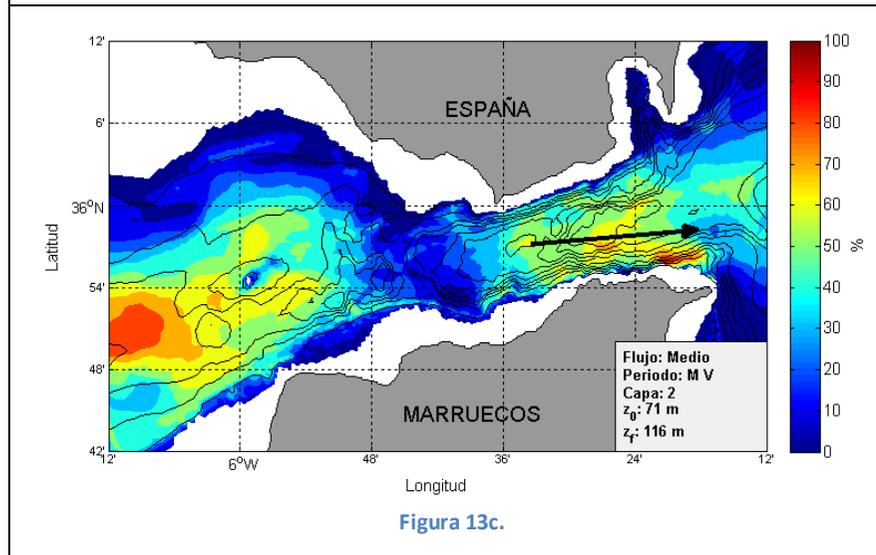
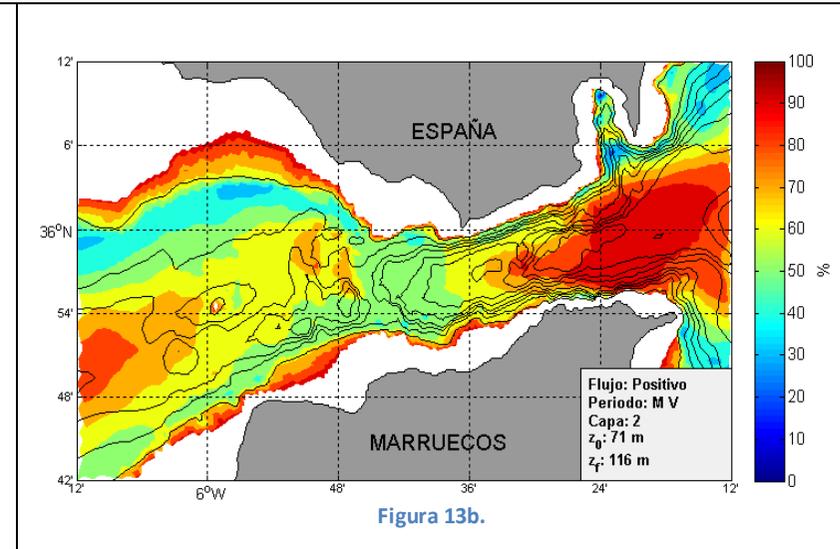
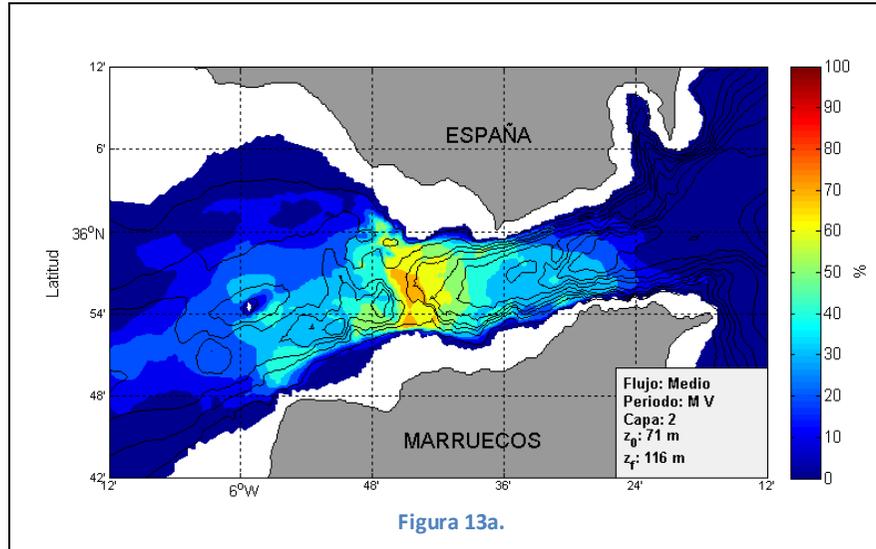


Figura 12.- Panel a: distribución espacial del indicador PDCEUI en la capa 1. Panel b: Idem del indicador PPSC. Panel c: Idem del indicador PPOC para la dirección $10^\circ \pm 15^\circ$ (indicada por la flecha negra). Panel d: Idem del indicador PPOC para la dirección $195^\circ \pm 15^\circ$ (indicada por la flecha negra). Panel e: Idem del indicador "ruido". Panel f: Idem del indicador "cizalla".



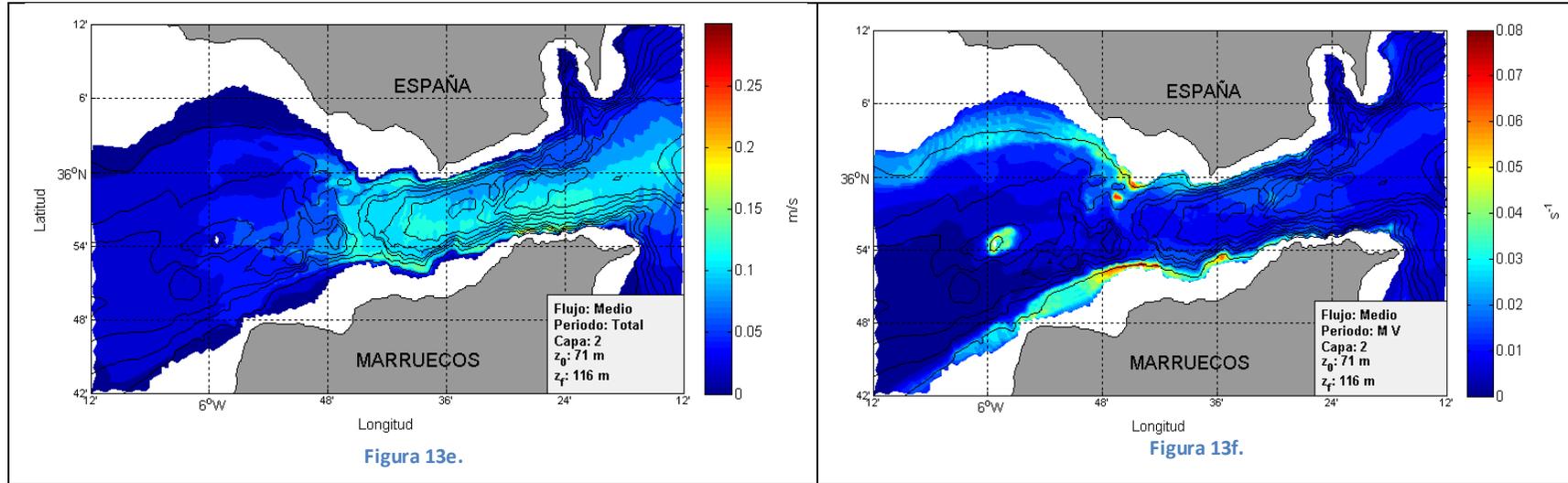
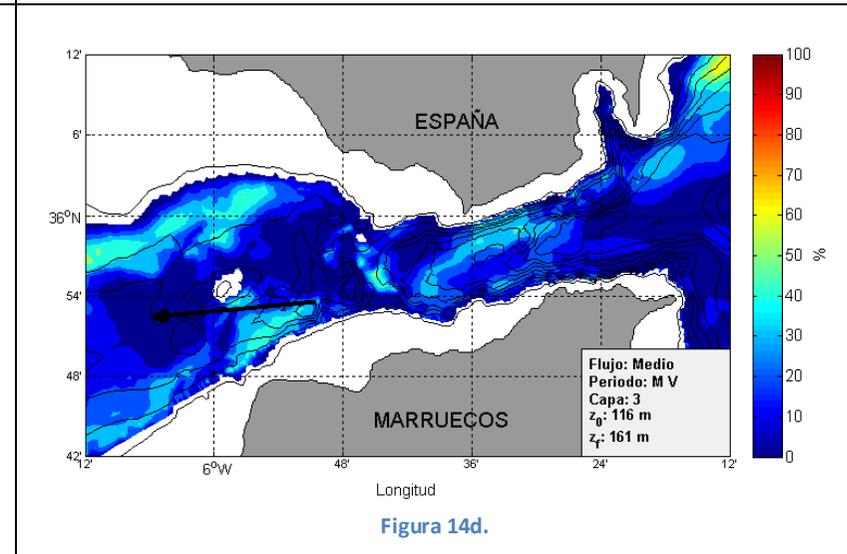
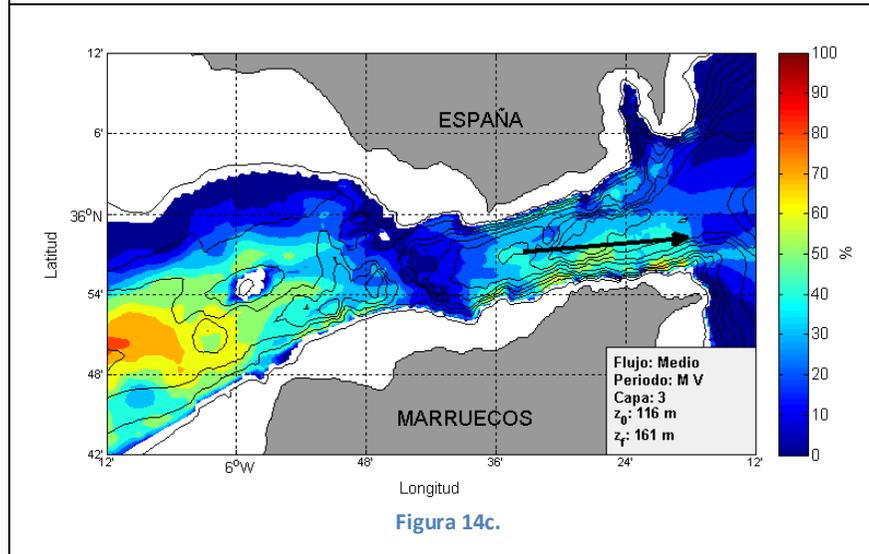
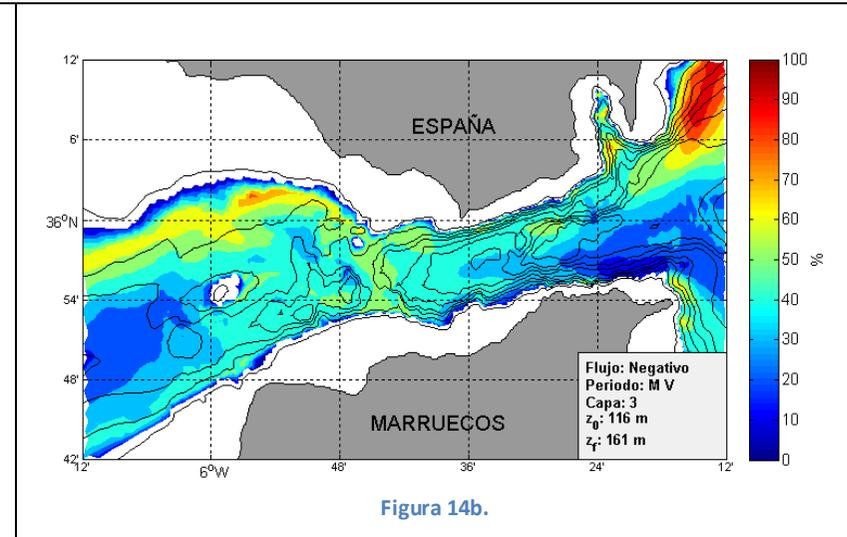
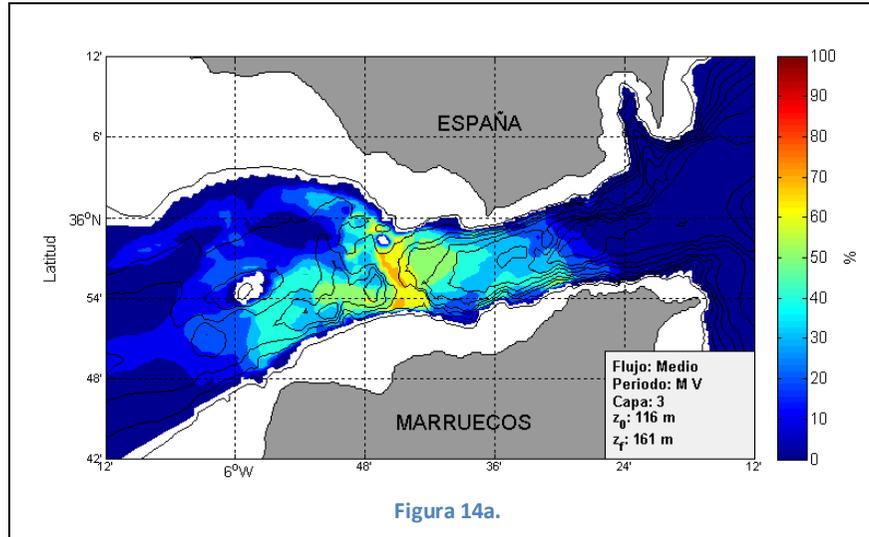


Figura 13.- Mismo que figura 12 para la capa 2.



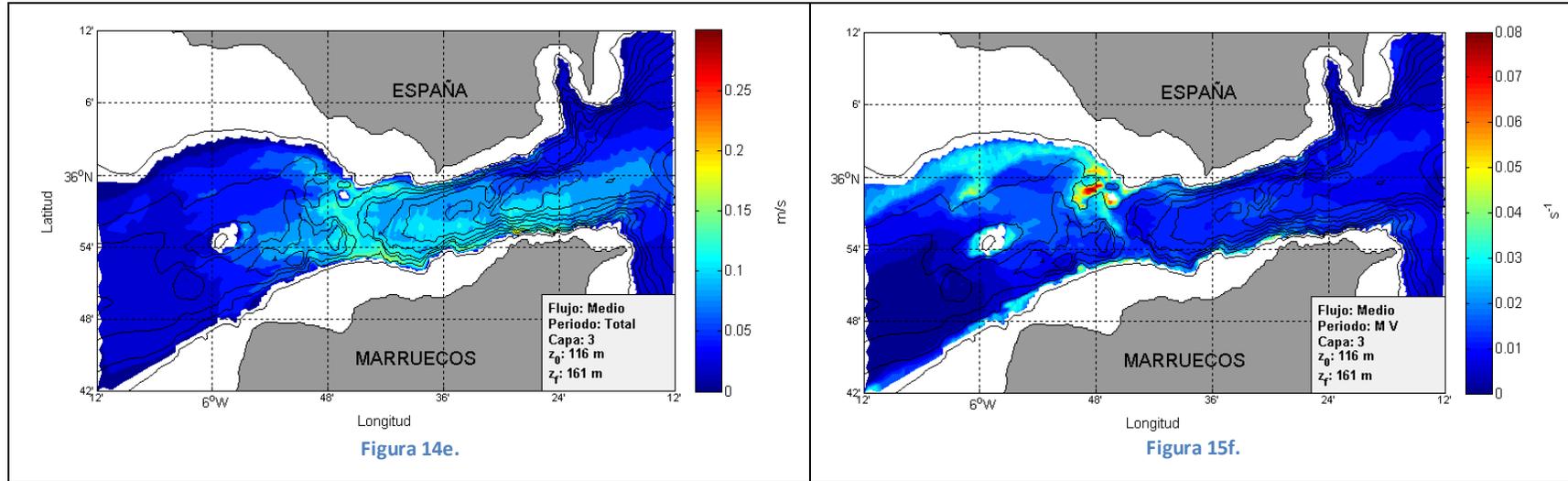


Figura 14.- Mismo que figura 12 para la capa 3.

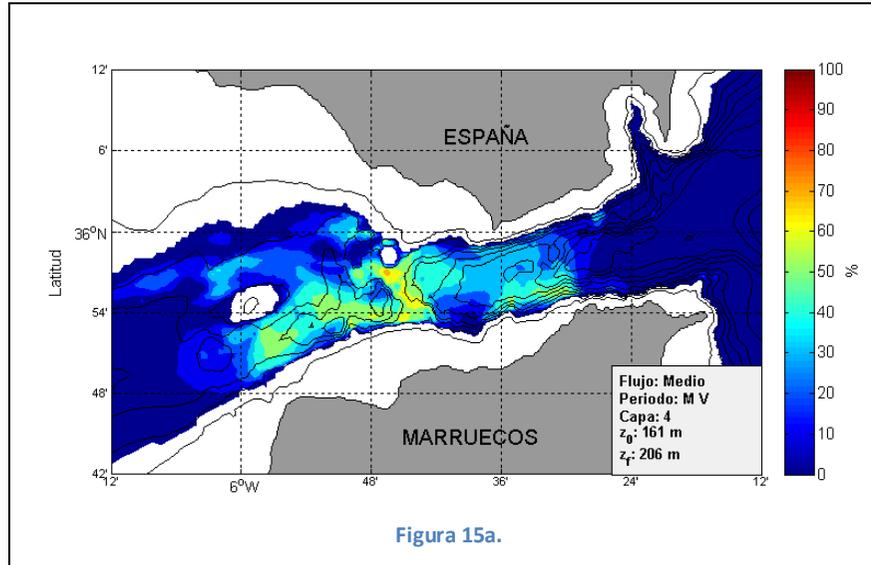


Figura 15a.

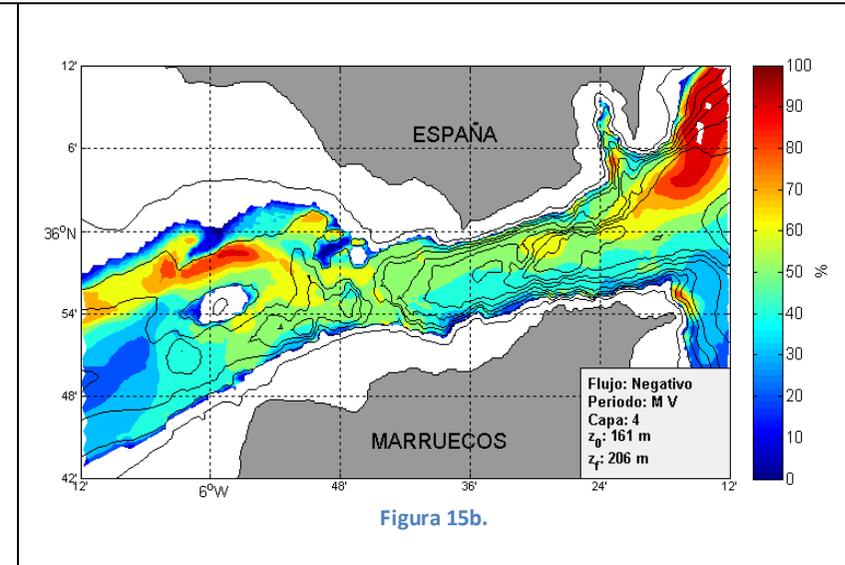


Figura 15b.

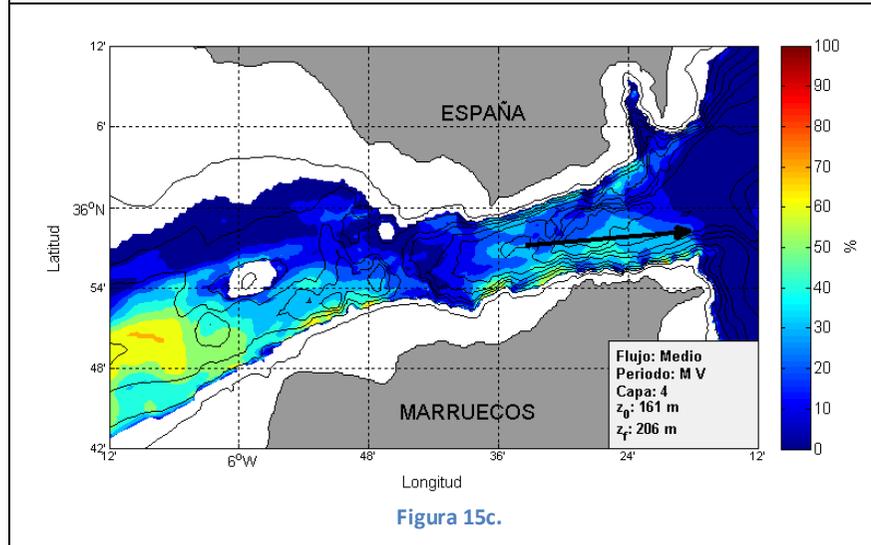


Figura 15c.

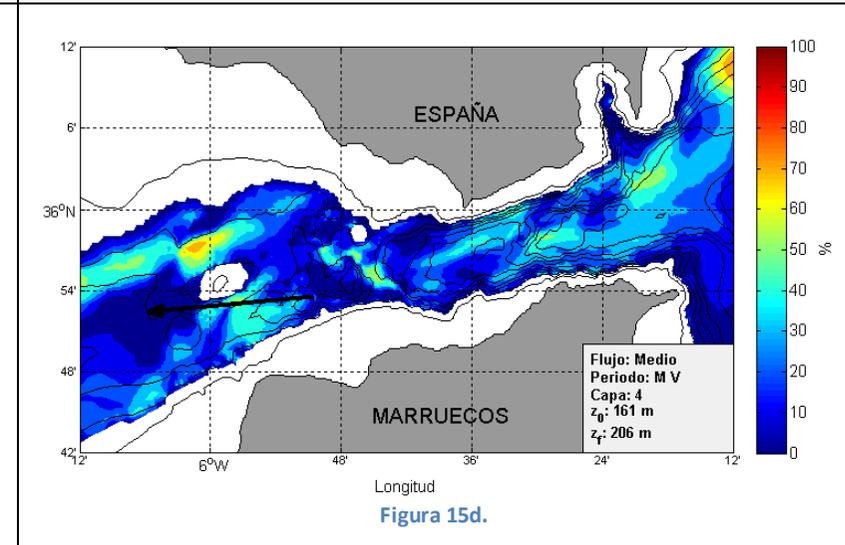


Figura 15d.

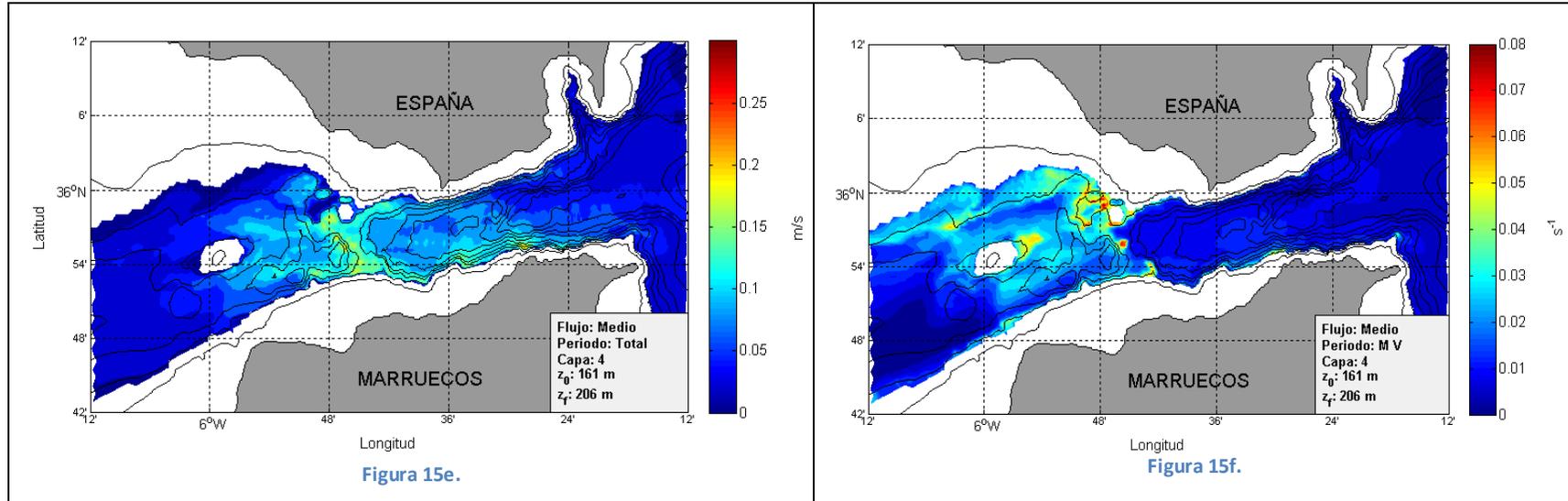


Figura 15.- Mismo que figura 12 para la capa 4.

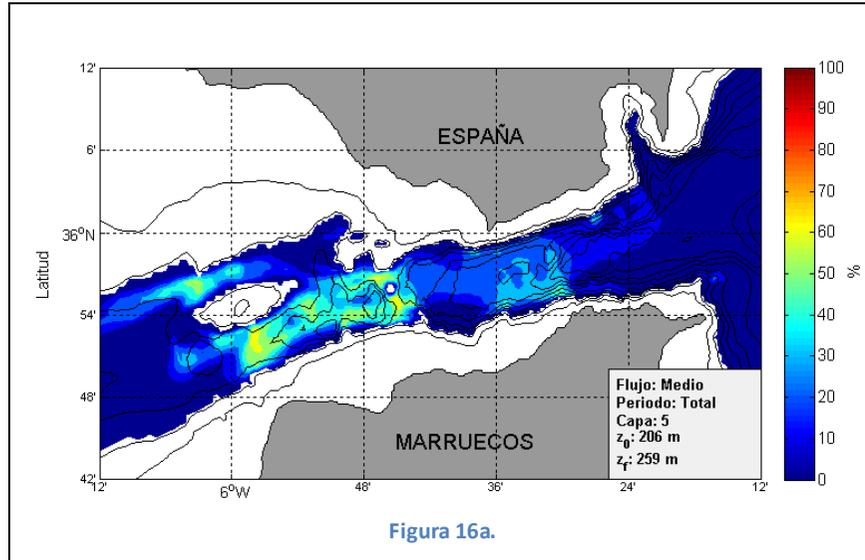


Figura 16a.

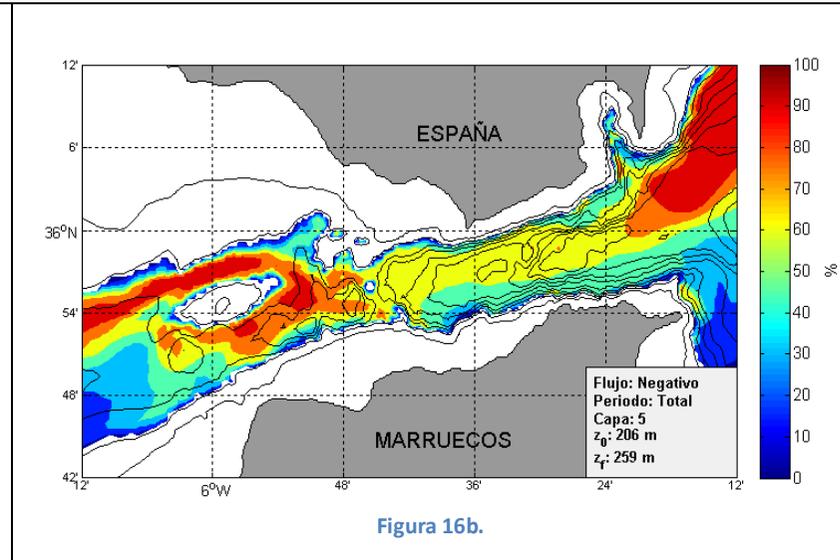


Figura 16b.

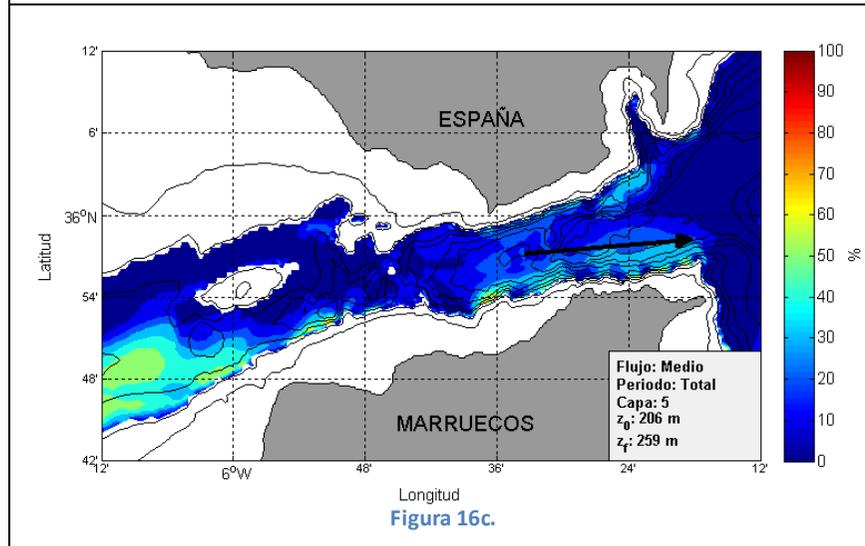


Figura 16c.

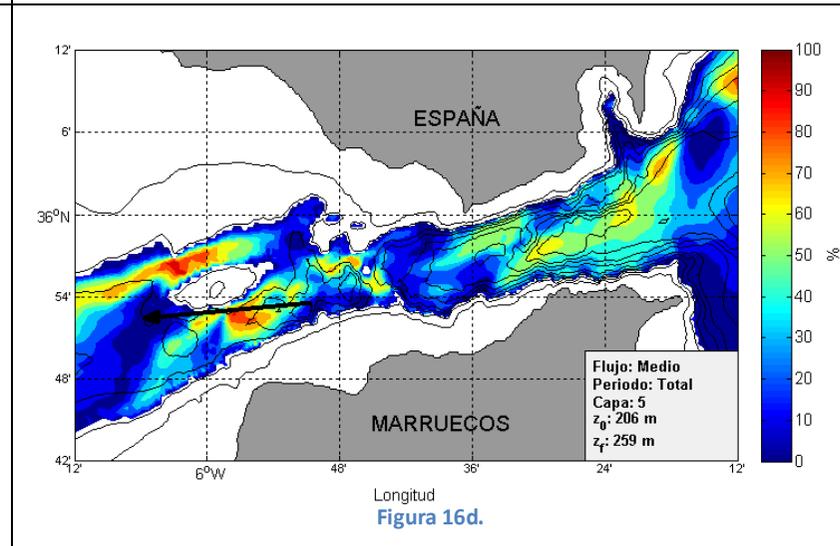


Figura 16d.

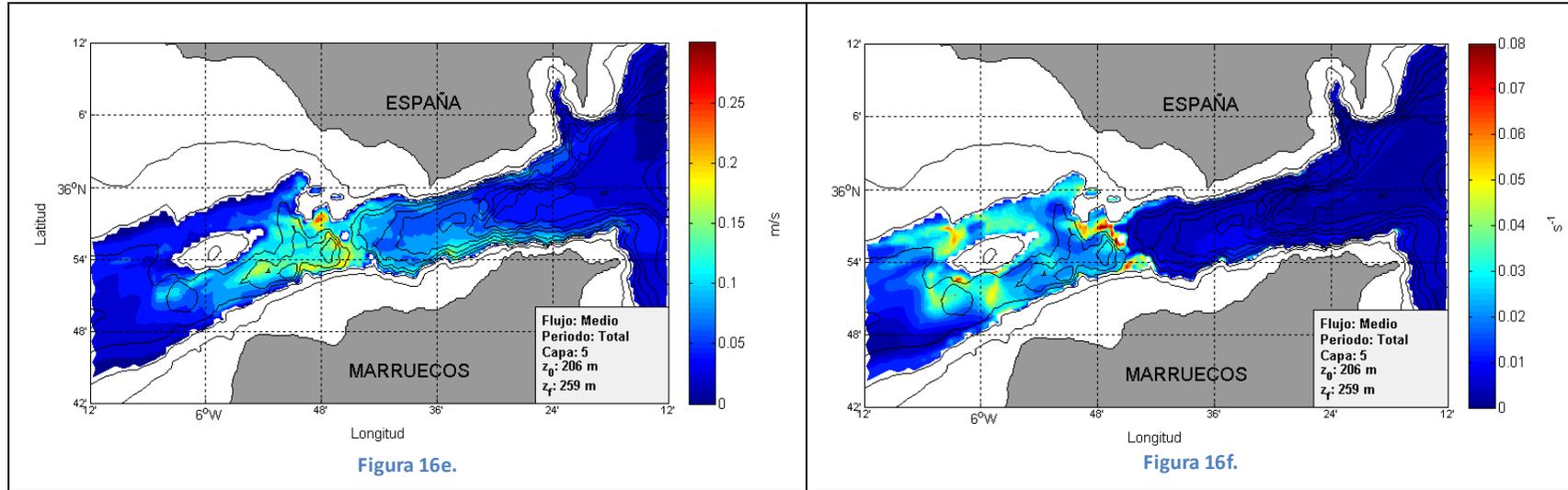
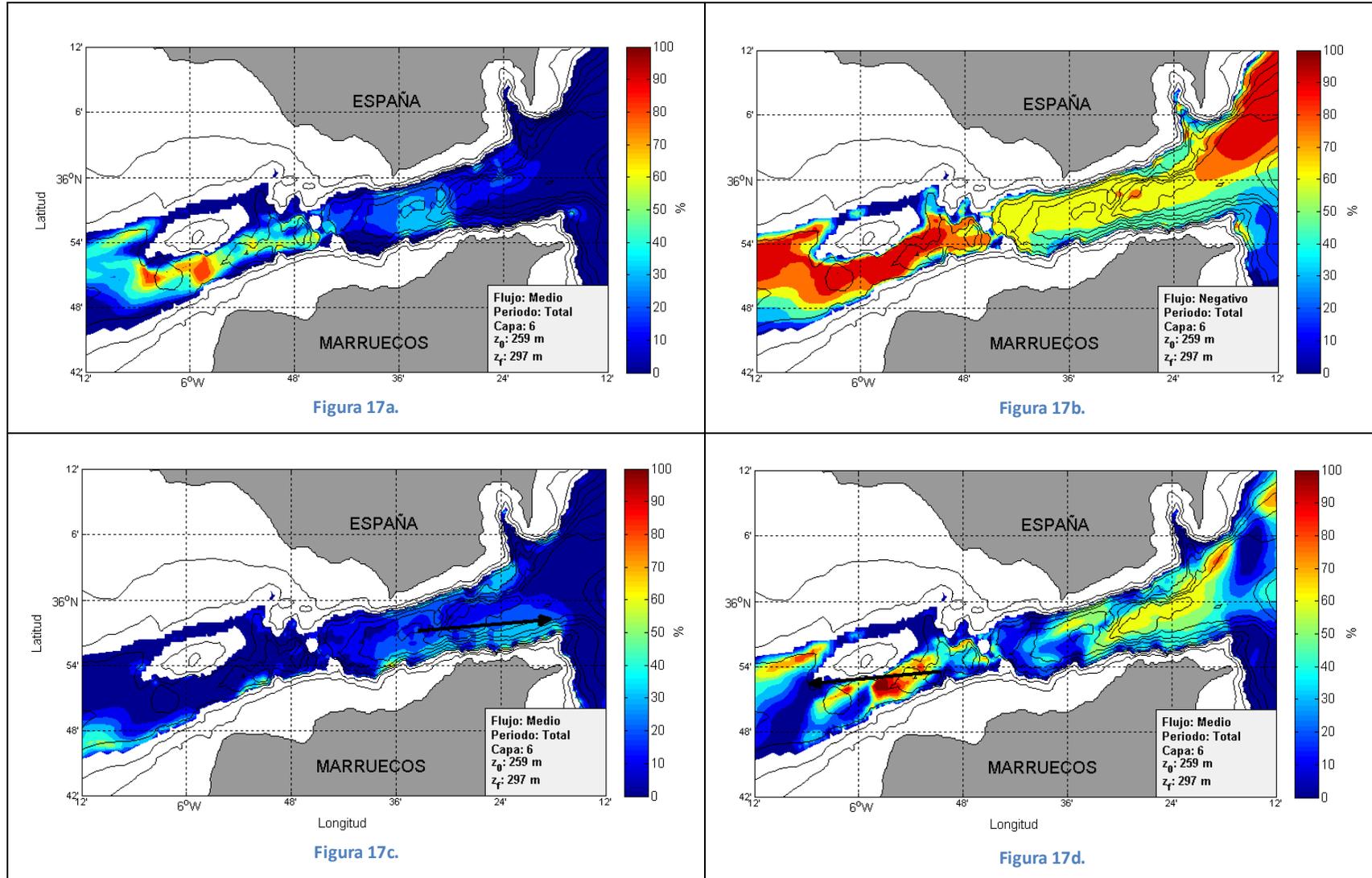


Figura 16.- Mismo que figura 12 para la capa 5.



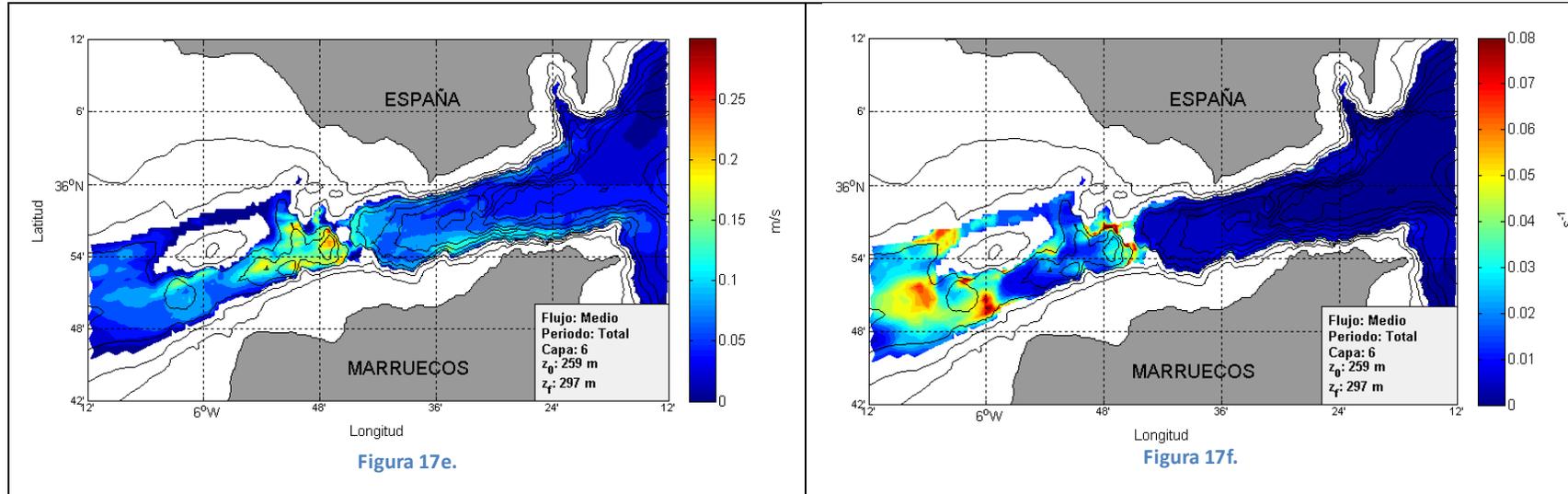


Figura 17.- Mismo que figura 12 para la capa 6.

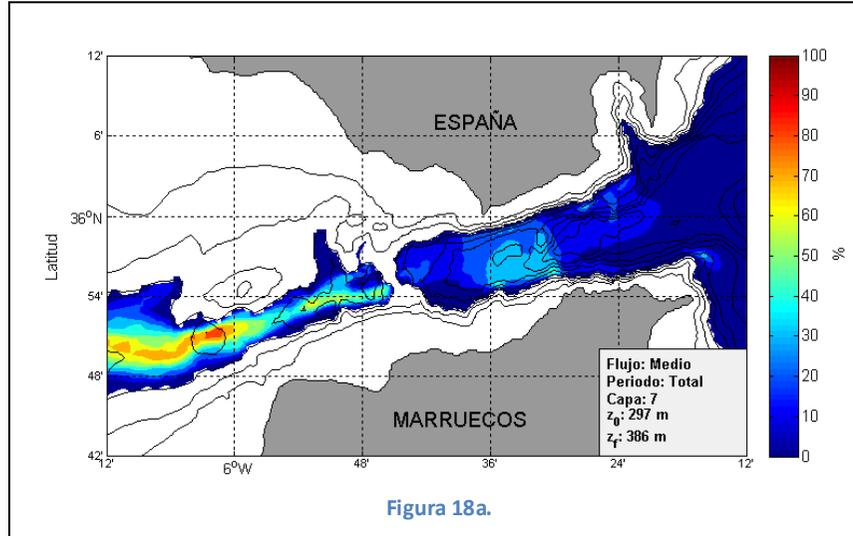


Figura 18a.

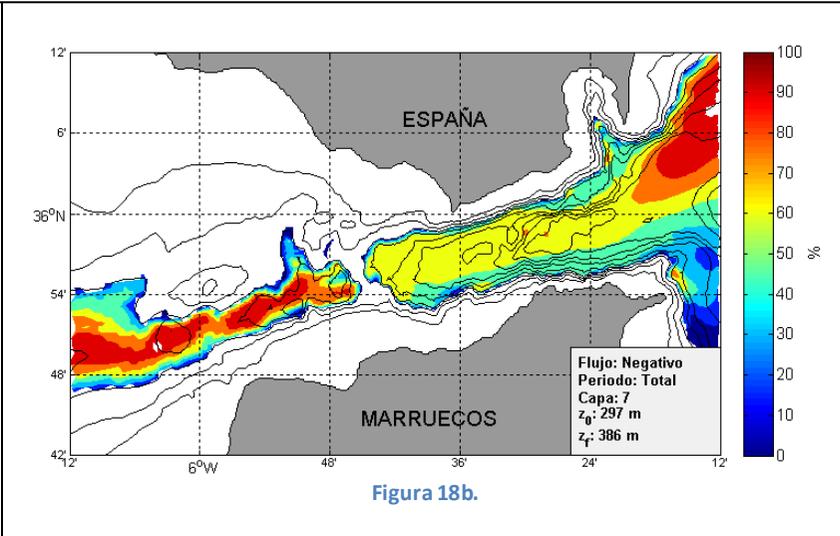


Figura 18b.

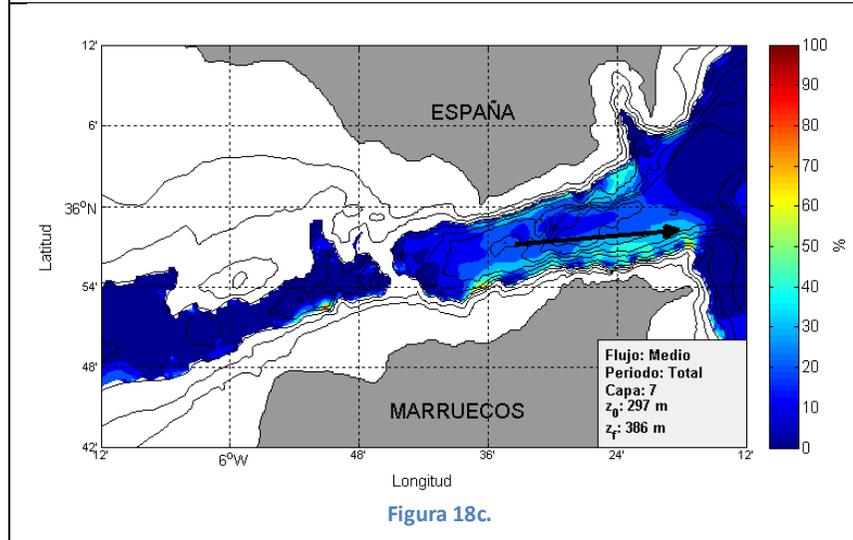


Figura 18c.

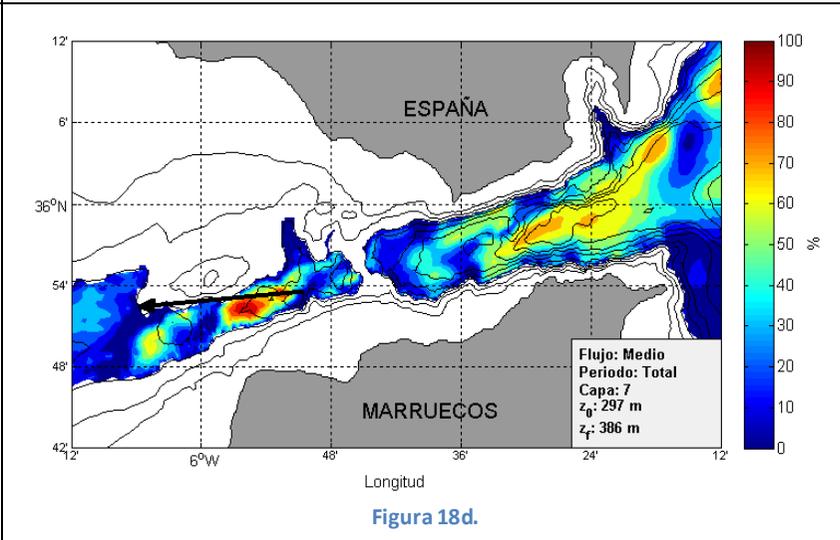


Figura 18d.



5.- Idoneidad de las distintas regiones.

5.1.- Evaluación de la idoneidad.

Teniendo en cuenta la intensidad de los flujos de energía, que es sin duda la variable más importante a considerar, y los distintos indicadores definidos y cuantificados en las secciones anteriores se puede abordar, al menos cualitativamente, la cuestión de qué región o regiones del área estudiada reúne las mejores condiciones para considerarla idónea a la hora de plantearse la instalación en ella de una central eléctrica basada en corrientes marinas.

Para ello se deberá definir una función de calidad o de idoneidad que tenga en cuenta los factores e indicadores anteriores. Estos últimos se los puede clasificar en dos categorías que denominaremos “restrictiva” y “no restrictiva”. En la primera se encuadran aquellos indicadores que, si no alcanzan un valor mínimo en una región, desaconsejan la instalación de cualquier central en ella por no ser económicamente rentable. A esta categoría pertenecería obviamente el flujo de energía (I en la tabla 2) y también el porcentaje de duración de la corriente por encima de un umbral de intensidad (PDCEUI, parametrizado por $P1$ en la tabla 2), el porcentaje de duración del sentido de la corriente (PPSC, $P2$ en la tabla) y el porcentaje de permanencia de la orientación de la corriente (PPOC, $P3$). La categoría no restrictiva engloba los indicadores que afectan más a la vida media de la instalación que a la extracción de energía en sí misma. A ella pertenecen el ruido y la cizalla de velocidad (parametrizados por R y C en la tabla 2, respectivamente).

Indicadores		VALOR			
		0	1	2	3
Restrictivos	$I (W/m^2)$	< 200	$[200,500)$	$[500,800)$	≥ 800
	$P1 (\%)$	< 50	$[50,75)$	$[75,90)$	≥ 90
	$P2 (\%)$	< 75	≥ 75	---	---
	$P3 (\%)$	< 50	$[50,80)$	≥ 80	---
No Restrictivos		0	0.10	0.15	0.20
	$R (m/s)$	< 0.05	$[0.05,0.15)$	$[0.15,0.25)$	≥ 0.25
	$C (s^{-1})$	< 0.02	$[0.02,0.04)$	$[0.04,0.06)$	≥ 0.06

Tabla 2.- Tabla con los valores asignados a los indicadores restrictivos y no restrictivos en función de su valor numérico. Los parámetros $P1$, $P2$ y $P3$ cuantifican respectivamente los indicadores restrictivos PDCEUI, PPSC y PPOC (ver texto) en tanto que I lo hace con el flujo de energía. Los parámetros R y C cuantifican los indicadores no restrictivos ruido y cizalla, respectivamente.



A cada uno de los parámetros se les ha asignado el valor numérico que figura en la tabla 2 y con ellos se ha definido la función de calidad V :

$$V = 6 \times I + I \times (P1 + P2 + P3) \times (1 - R) \times (1 - C) \quad (14)$$

que cumple:

- La función V es siempre positiva y cuanto más alto sea su valor numérico en una región, mejores condiciones reúne la misma para una eventual instalación de una central de energía renovable basada en corrientes marinas.
- El mínimo posible valor de V es cero y el máximo es 36. En el hipotético caso ideal $V=36$, la mitad de este valor proviene del primer sumando que solamente considera el flujo de energía en tanto que la otra mitad proviene del segundo sumando en el que el flujo de energía representa un tercio de su valor también. De esta forma, y como no podía ser de otra manera, el flujo de energía es la variable más importante en la función V .
- Los valores reales de la función V no alcanzan ese valor ideal de 36 nunca. Aplicando la ecuación (14) a los resultados obtenidos en este estudio para los diferentes indicadores y a la vista de los resultados se ha establecido un grado de viabilidad que es el que refleja la tabla 3.

<i>Viabilidad</i>	
<i>[0, 9)</i>	<i>No Viable</i>
<i>[9, 18)</i>	<i>Viable</i>
<i>[18, 27)</i>	<i>Muy Viable</i>
<i>≥ 27</i>	<i>Recomendable</i>

Tabla 3.- Rango de valores para el grado de viabilidad.

El procedimiento seguido para realizar la parametrización de los términos restrictivos y los no restrictivos ha sido diferente. En el primer caso, se ha optado por asignar los parámetros a la matriz tridimensional resultante de hacer el promedio temporal de la intensidad de corriente y de cada uno de los indicadores PDCEUI, PPSC y PPOC. De esta forma obtenemos unas matrices de I , $P1$, $P2$ y $P3$ y a partir de ellas se realiza la media vertical de cada capa. En el segundo caso, para los términos no restrictivos, se parte de las matrices representativas de cada capa y a estos valores se les asigna los parámetros directamente. Se ha optado por este procedimiento ya que la cizalla máxima se definía como el valor máximo de la cizalla que tenía lugar en cada capa. Para el caso del ruido, se optó por hacer la media vertical de las velocidades u y v previamente al filtrado por



motivos que se expusieron en el apartado de “Mapas de ruido” y porque, de esta forma, sigue la analogía con los términos no restrictivos.

En los paneles “a” de las figuras 19 a 25 se ha calculado la función de calidad para flujos medios, sin embargo, los parámetros P2 y P3 se obtienen considerando un sentido. Por tanto, esos paneles son adecuados para servir de guía en caso de dispositivos que funcionen orientados para una única dirección. Si considerásemos un dispositivo diseñado para funcionar igual en ambos sentidos y tener una idea de la energía que se puede aprovechar de ambas contribuciones, para cuantificar la función de calidad en este caso se toma el flujo medio, a P2 se le asigna el valor máximo y P3 se toma de acuerdo a la dirección preferente según la profundidad, es decir, en las capas superficiales (1 y 2) se tomaría la dirección de 10º mientras que en el resto de las capas en las que el flujo negativo es más intenso, se toma la dirección de 195º. Debido a estas consideraciones, el resultado directo dado por la expresión (14) no es el correcto en este caso y para cuantificarlo correctamente habría que estudiar ambas contribuciones, positivo y negativo, por separado.

5.2.- Patrón espacial.

Las figuras 19 a 25 muestran gráficamente la distribución espacial de la función de calidad en las distintas capas. Se ha optado por representarla para periodos de mareas vivas y considerando los flujos entrantes y los salientes por separado. La primera decisión está argumentada por el hecho de que se quiere mostrar el potencial energético que, evidentemente, es superior en esos periodos de mareas vivas. Una idea bastante realista de cómo serían en otros periodos puede obtenerse comparando los paneles “f” y “h” (y los “g” y “i”) en el conjunto de figuras 4 a 10, por lo que no se considera importante incluir nuevas figuras para mareas muertas aquí. La segunda decisión de separar flujos entrantes y salientes en vez de representar flujos medios se basa en el hecho de que éstos, durante el periodo de promedio, son siempre menores que los que se mueven en una u otra dirección debido a que el promedio incluye los flujos de ambos signos y llevan por tanto a conclusiones erróneas.

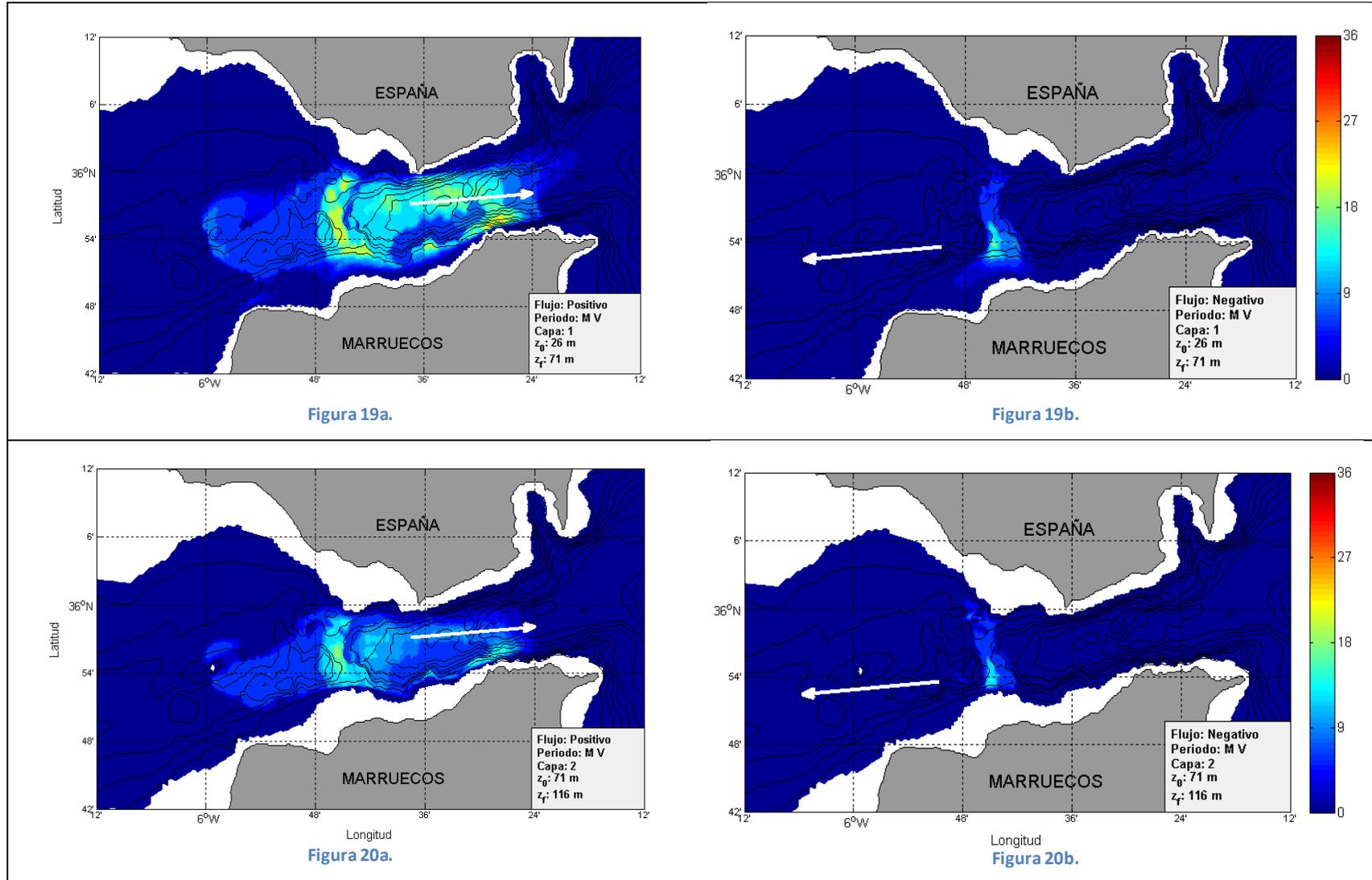
Dentro de lo que sería la capa superior atlántica (capas 1 y 2 en nuestra selección) se observan altos valores de la función de calidad en la parte oriental del estrecho (hacia el este del umbral de Camarinal) para flujos positivos, especialmente en la capa 1 (figura 19a). También se registran valores altos sobre el propio umbral de Camarinal para flujos negativos, aunque muy restringidos espacialmente a la zona del umbral en este caso (figuras 19b y 20b). Lo anterior sugiere que estas capas, especialmente la primera, son adecuadas para la instalación de dispositivos que trabajen con flujos unidireccionales, que deberían ubicarse en la parte más oriental del Estrecho al Este de la sección de Tarifa, o bidireccionales que en este caso deberían ubicarse en la sección del umbral de Camarinal.

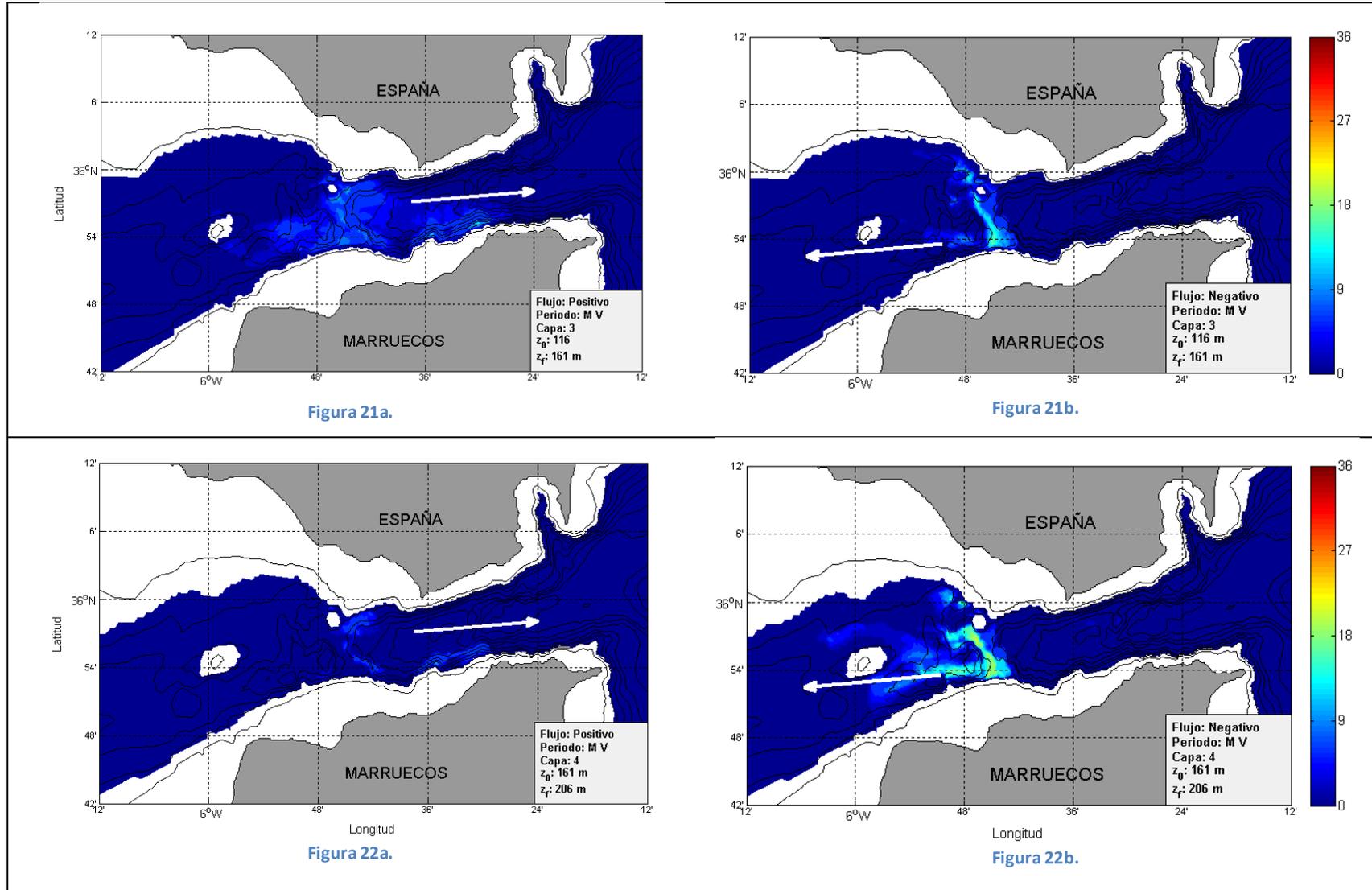
La capa 3 queda en la zona interfacial que separa los flujos entrante atlántico y saliente mediterráneo, como ya se ha comentado en alguna ocasión con anterioridad. Ello hace las



Flujos de energía en el Estrecho de Gibraltar. Proyecto FLEGER (RNM-3738).

corrientes en ella sean relativamente débiles y que sea una capa poco interesante desde el punto de vista de extracción de energía. Las figuras 21a y 21b reflejan este hecho; solamente sería aprovechable el flujo saliente (figura 21b) pero con valores muy moderados y restringidos a una muy pequeña área sobre el umbral de Camarinal. A partir de la capa 4 (figuras 22 a 25) la distribución de la función de calidad indica que son sólo los flujos de energía hacia el Atlántico (negativos) los que tienen interés. Los flujos de energía positivos, que existen, son tan débiles que no son aprovechables en absoluto. Los mayores valores de V se alcanzan en las inmediaciones del umbral de Espartel (figuras 24b y 25b) como consecuencia de que el control hidráulico del flujo saliente por Espartel no llega a desbordarse nunca y mantiene unos valores altos de intensidad de corriente, de permanencia temporal y también de direccionalidad.





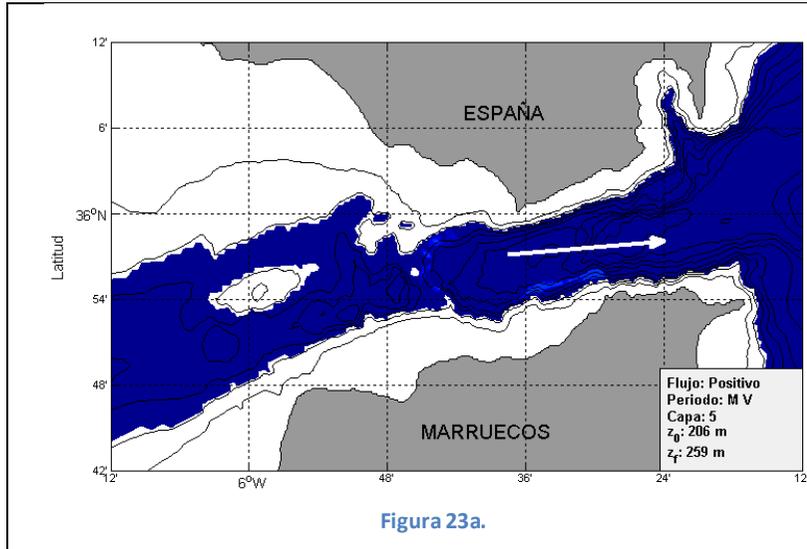


Figura 23a.

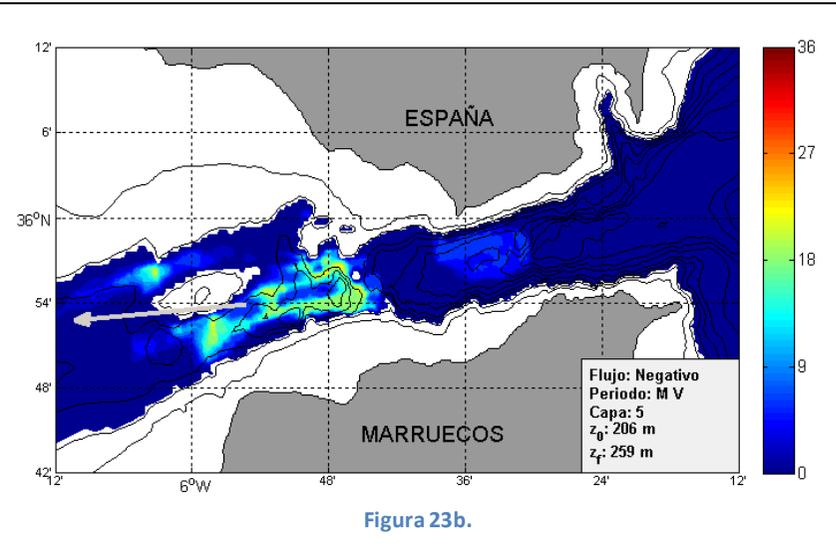


Figura 23b.

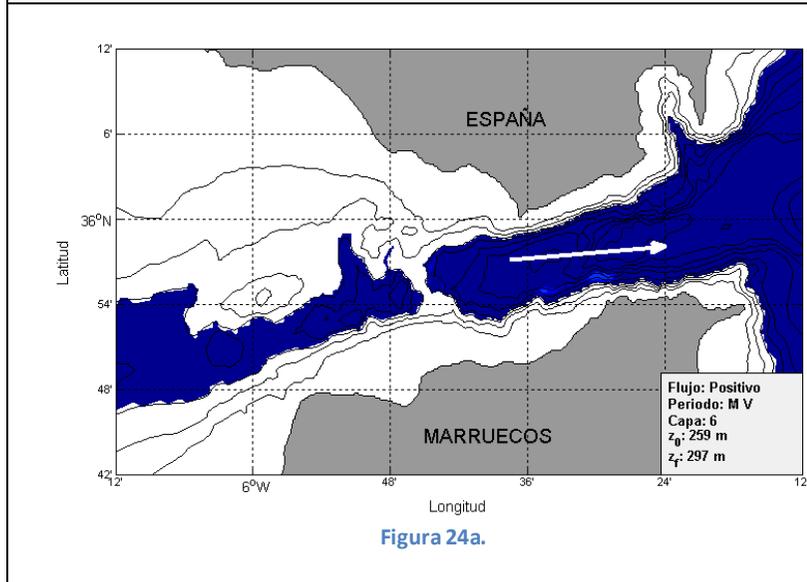


Figura 24a.

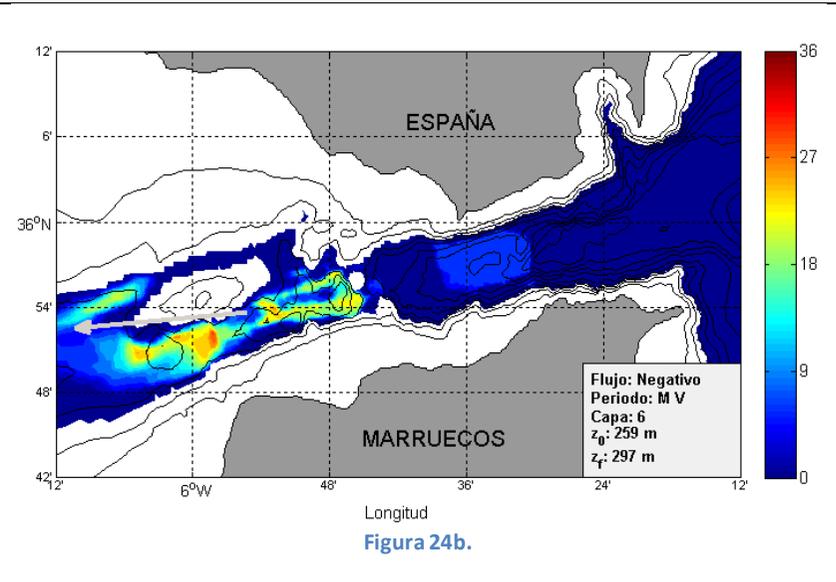


Figura 24b.

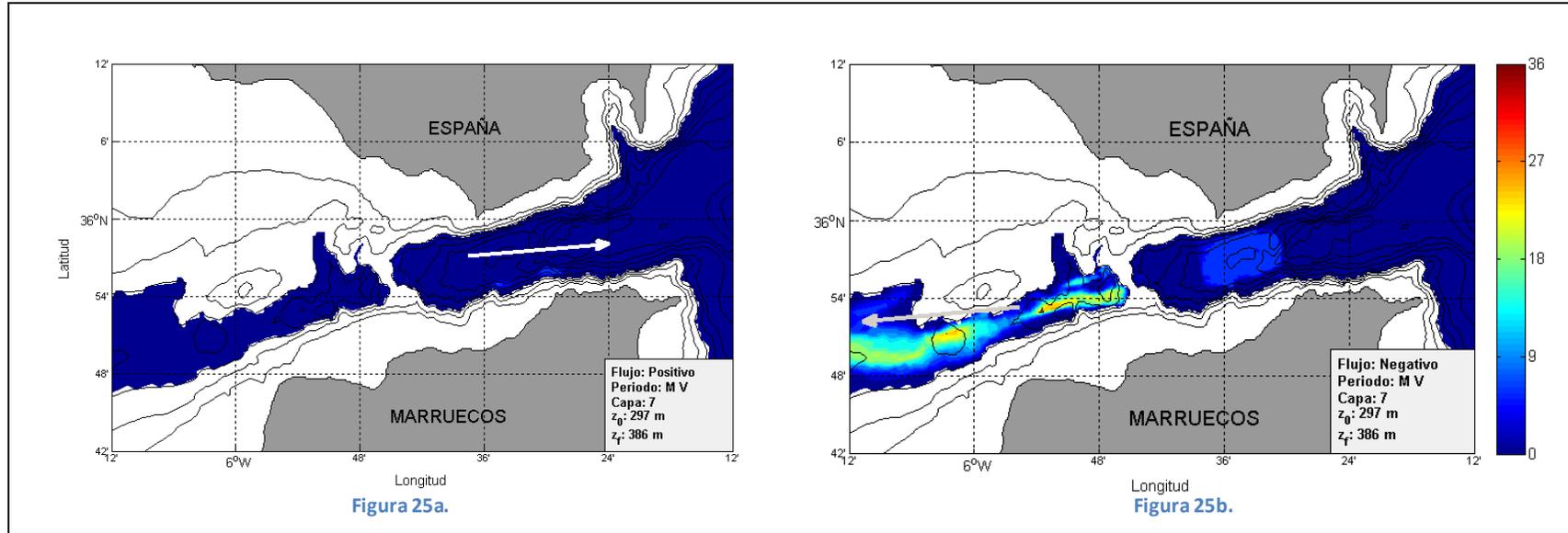


Figura 19.- Panel "a". Distribución espacial del grado de viabilidad en la capa 1 con flujo en sentido negativo. Panel "b". Idem que el panel "a" en sentido negativo.

Figura 20.- Mismo que la figura 19 para la capa 2.

Figura 21.- " " " " " " " " 3.

Figura 22.- " " " " " " " " 4.

Figura 23.- " " " " " " " " 5.

Figura 24.- " " " " " " " " 6.

Figura 25.- " " " " " " " " 7.



6.- Resumen y conclusiones.

A lo largo del informe y con la ayuda del modelo numérico de alta resolución implementado para simular el intercambio de aguas a través del Estrecho de Gibraltar que incluye el forzamiento mareal (fenómeno decisivo para explicar la alta intensidad de corrientes marinas observadas en el Estrecho) se ha ido investigando el potencial de estas corrientes para su uso como fuente de energías renovables. La variable fundamental para evaluar esa potencialidad es el flujo de energía (ecuación [2]) que tiene una importante variabilidad temporal, debida fundamentalmente a las mareas, y espacial, aspecto este al que se ha prestado especial interés para poder identificar las zonas más adecuadas de toda la región del Estrecho para la instalación de centrales eléctricas que extraigan energía de las corrientes.

En este estudio, la variabilidad temporal se ha abordado mediante la técnica usual de promediar durante distintos intervalos de tiempo y durante periodos de condiciones dinámicas diferentes (i.e., mareas vivas y mareas muertas). La variabilidad espacial se ha trabajado dividiendo el eje vertical (tercera dimensión) en capas pre-establecidas cuyos espesores fuesen suficientes como para albergar holgadamente en su seno una turbina de palas de dimensiones medias. La Tabla 1 define esas capas que tienen sobre 50m de espesor. La variabilidad horizontal se ha estudiado y representado mediante la realización de mapas de contornos de las distintas variables para las distintas capas. Las figuras 4 a 11 muestran los resultados obtenidos para la variable fundamental de flujos de energía.

Además de esta variable existen otros parámetros, denominados indicadores en este informe, que tienen importancia para la identificación de zonas óptimas. Se han definido hasta 5 (Sección 4 del informe) que tienen que ver con la permanencia en el tiempo del flujo de energía por encima de un valor umbral, con la direccionalidad de la corriente y con la permanencia de la misma a lo largo de una orientación preferencial (el eje del Estrecho, obviamente) así como otros factores que pueden tener incidencia negativa en la vida media de una central como puede ser el “ruido” (identificado en nuestro caso con ondas internas de alta frecuencia, ver apéndice y también animación en <http://oceano.uma.es/fleger>) o la cizalla vertical de las corrientes horizontales. Las figuras 12 a 18 muestran cómo quedan distribuidos espacialmente estos indicadores.

Con toda la información anterior se ha abordado la pregunta de ¿qué región/regiones reúnen las mejores condiciones para instalar una central de energía renovable marina en ella/ellas? Para ello se ha optado por definir una función de calidad (ecuación [14]) y se han asignado valores a los distintos indicadores y al propio flujo de energía (Tabla 2) para poder identificar las zonas más viables del Estrecho de Gibraltar a tal fin. Es innecesario decir que el mayor peso en esa función lo debe llevar (y lo lleva) la variable flujo de energía pero también es importante notar que una corriente intensa que por sí sola garantice la viabilidad de una zona dada puede verse muy favorecida si reúne otras condiciones de estabilidad en cuanto a orientación y permanencia



temporal. Estos últimos aspectos son los que han motivado la definición y mapeado de esa función de calidad.

Su rango teórico es $0 \leq V \leq 36$ pero en la práctica el conjunto de valores en el que se mueve es bastante más restringido. En función de ese rango práctico se han delimitado valores empíricos para catalogar la viabilidad estando especificados en la tabla 3 los límites de V que separan la idoneidad o no de las distintas zonas. Se considera que el valor a partir del cual comienza a ser viable la instalación de una central eléctrica es $V = 9$. Este valor se alcanza, por ejemplo, cuando el parámetro I asociado al flujo de energía sea $I = 1$ (flujos de energía medios de 300 a 500 Wm^{-2}) y cuando el segundo sumando de V sea igual a 3 . Con $I = 1$, ello implica valores considerables de los otros indicadores, es decir, condiciones muy satisfactorias de la permanencia por encima del umbral y de una orientación muy estable de las corrientes (valores altos de $P1$, $P2$ y $P3$) amén de ruido y cizalla relativamente bajos.

Las figuras 19 a 25 muestran la distribución espacial de esta función de calidad. Con los criterios establecidos en la Tabla 3, las regiones con colores azul celeste ($V \approx 10$) comenzarían a ser viables aunque, evidentemente, cuanto más amarilla-rojiza la región mucho mayor es esa viabilidad. En esas figuras aparece representada la función V para flujos positivos y negativos. La inspección conjunta de los paneles "a" y "b" de cada figura (flujos positivos y negativos, respectivamente) da además una información importante sobre la tecnología que debería ser utilizada: las turbinas a instalar pueden estar diseñadas para trabajar con flujos de energía unidireccionales (sólo extraen energía cuando el flujo avanza en la dirección y sentido hacia el cual se orienta la turbina) o bidireccionales (pueden hacerlo cuando el flujo avanza en esa dirección y sentido o en la opuesta). En los mapas de esas figuras, las regiones en las cuales los colores son azules oscuros en uno de los paneles (no viabilidad) y con colores cálidos en el otro (viabilidad) serían regiones adecuadas para la instalación de turbinas unidireccionales. Esta situación se da en la parte oriental del Estrecho en las capas 1 y 2 para flujos positivos (figuras 19 y 20) en la zona del umbral de Camarinal en la capa 4 para flujos negativos (figura 22) y en la zona de la cuenca de Tánger y, especialmente, umbral de Espartel en las capas 5 y 6 para flujos negativos también (figuras 23 y 24). Por el contrario si una misma región muestra colores cálidos en ambos paneles, esa región sería adecuada para la instalación de dispositivos bidireccionales. Es el caso de la zona del umbral de Camarinal en las capas 1 y 2 (figuras 19 y 20).

Es evidente que los mapas de flujos de energía y de la función de calidad están totalmente influenciados por la hidráulica del Estrecho de Gibraltar. La estructura bicapa (flujo superficial proveniente del Atlántico que se dirige hacia el Mediterráneo y contracorriente más profunda asociada al flujo saliente) y el control hidráulico ejercido por los umbrales de Espartel y Camarinal sobre estos flujos son los principales condicionantes de la dinámica de las corrientes oceánicas en el Estrecho. Es de esperar que las zonas con mayor viabilidad para la extracción de energía aprovechen cada uno de estos flujos y estén condicionadas por las características de éstos, aunque la presencia de las mareas hace que en determinados lugares sea posible el aprovechamiento de energía de las corrientes en ambos sentidos, como es el caso del umbral de



Flujos de energía en el Estrecho de Gibraltar. Proyecto FLEGER (RNM-3738).

Camarinal. Aun así, las mejores zonas para la posible instalación de centrales eléctricas están asociadas a la unidireccionalidad de las corrientes en las partes más oriental (flujos positivos) y más occidental (flujos negativos) del Estrecho. Según se muestra en diversas figuras, la zona con mejores condiciones es el umbral de Espartel en la parte occidental (figura 24b), mejores que las que reúne la parte oriental del Estrecho (figura 19a) donde, además, la gran profundidad existente (superior a los 700-800m, ver figuras 1 y 2) supone otra dificultad técnica añadida para ubicar la turbina en su profundidad de trabajo.

En la función de calidad no se ha incluido ningún parámetro técnico ajeno a los propios del fluido, como pueden ser la profundidad donde se debe instalar la central, o la distancia de la misma a costa (pérdidas de energía en el transporte) o la posibilidad de acceso a ciertas zonas que pudiera estar restringida por las rigurosas medidas de navegación que existen en el Estrecho u otras causas. Todas ellas repercuten o pueden repercutir en el coste de instalación y de mantenimiento de la central. Tampoco se han tenido en cuenta otros aspectos socio-políticos (algunas de las zonas idóneas son de soberanía marroquí, concretamente la zona que reúne las condiciones más favorables parece que lo es). El informe se ha centrado en el estudio y análisis de los aspectos científicos exclusivamente.



7.- Referencias.

- Armi, L. and Farmer, D.M, (1985): "The Internal Hydraulics of the Strait of Gibraltar and Associated Sills and Narrows", *Oceanol. Acta* 8 37-46.
- Armi, L and Farmer, (1988): "The flow of the Mediterranean water through the Strait of Gibraltar", *Progress in Oceanography* 21, 1-105.
- Bruno, M., J.J Alonso, A. Cózar, J. Vidal, A. Ruiz Cañavete, F. Echevarría, and J. Ruiz, (2002): "The boiling water phenomena at Camarinall sill, the Strait of Gibraltar", *Deep Sea Res. II*, 49, 4097-4113.
- Bryden y Kinder, (1991): "Steady two-layer exchange through the Strait of Gibraltar", *Deep Sea Res.*, 38, S1, S445-S463.
- Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N. and Bossanyi, E., (2001): "Wind Energy Handbook", *Jhon Wisley and Sons, New York*, 643 pp.
- Candela, J., C Winant, and A. Ruiz, (1990): "Tides in the Strait of Gibraltar", *J. Geophys. Res.*, 95, 7313-7335.
- Carter, G.S., and M. A. Marrieffield, (2007): "Open boundary conditions for regional tidal simulations", *Ocean Modell.*, 18, 194-209.
- Delgado, J., García Lafuente, J. and Vargas, J. M, (2001): "A simple model for submaximal Exchange through the Strait of Gibraltar" *Scientia Marina*, 65 (4), 313-322.
- García Lafuente, J., Vargas, J.M., Plaza, F., Sarhan, T., Bascheck, B y Candela, J. ,(2000): " Tide at the Eastern Section of the Strait of Gibraltar", *Journal of Geophysical Research*, vol 105, nº c6, 14197-14213.;
- García Lafuente y Criado Aldeanueva, (2001): "Física de la Tierra. Oceanografía Física: su investigación en España. Número 13".
- Gorban, A.N., Gorlov, A.M y Silantsev, V. M., (2001): "Limits of the turbine efficiency for free flow" *Journal Energy Resources Technology*, 123, 311-317.
- Hundsdorfer, W., B. Koren, M. van Loon, and J. G. Verwer, (1995): "A positive finite- difference advection scheme", *J. Comput. Phys.*, 117,35-46.
- Leith, C. E, (1968): "Diffusion approximation for two dimensional turbulence", *Phys. Fluids*, 10, 1409-1416.
- Marshall, J., C. Hill, L. Perelman and A. Adcroft (1997.a), "Hydrostatic, quasi-hydrostatic and, nonhydrostatic ocean modelling", *J. Geophys. Res.*, 102, 5733-5752.
- Marshall, J., Adcroft, A., Hill, C, Perelman, L., Heisey, C., (1997.b): "A Finite-Volume, Incompressible Navier Stokes Model for Studies of the Ocean on Parallel Computers." *J. Geophys. Res*, 5753-5766.



- Medar Group (2002), Medatlas (2002): "Mediterranean and Black Sea Database of Temperature, Salinity and Bio-Chemical Parameters Climatological Atlas", *Eur. Comm.MarSci.and Thecnol. Programme Paris*.
- Pacanowski, R. C., and S. G. H. Philander (1981): "Parametrisation of vertical mixing in numerical models of tropical oceans", *J. Phys. Oceanogr.*, *11*, 1443-1451.
- Sánchez Garrido, José Carlos; García Lafuente, Jesús; Criado-Aldeanueva, Francisco; Baquerizo, Asunción; Sannino, Gianmaria, (2008): "Time-spatial variability observed in velocity of propagation of the internal bore in the Strait of Gibraltar", *Journal of Geophysical Research*, *113*, doi: 10.1029/2007JC004624.
- Sánchez Garrido, José Carlos; Sannino, Gianmaria; Liberti, Luca; García Lafuente, Jesús; Pratt, Larry, (2011): "Numerical modeling of three dimensional stratified tidal flow over Camarinal Sill, Strait of Gibraltar", *Journal of Geophysical Research*, *116*, doi: 10.1029/2011JC007093.
- Sánchez Garrido, José Carlos, (2009): "Generación y propagación de ondas internas en el Estrecho de Gibraltar: efectos 3-D y de rotación". PhD Thesis. University of Málaga.
- A. Sánchez Román, G. Sannino, J. García-Lafuente, A. Carrillo and F. Criado-Aldeanueva, (2009): "Transport estimates at the western section of the Strait of Gibraltar: A combined experimental and numerical modeling study." *Geophys. Res.*, *114*, C06002 doi: 10.1029/2008JC005023.
- Sannino, G., A. Bargagli, and V. Artale, (2002); "Numerical modelling of the mean Exchange through the Strait of Gibraltar", *J. Geophys. Res.*, *107(C8)*, 3094, doi: 10.1029/2001JC000929.
- Sannino, G., A. Bargagli, and V Artale (2004); "Numerical modelling of the semidiurnal tidal Exchange through the Strait of Gibraltar", *J. Geophys. Res.*, *109*, C05011, doi: 10.1029/2003JC002057.
- Sannino, G., L Pratt, and A. Carrillo, (2009): "Hydraulic criticality of the exchange flow through the Strait of Gibraltar", *Phys. Oceanogr.*, *39*, 2779-2799, doi:10.1175/2009JPO4075.1.
- Vlasenko, V.I, J. C Sánchez Garrido, N. Stashchuk, J. García Lafuente and M. Losada, (2009): "Three-dimensional evolution of large-amplitude internal waves in the Strait of Gibraltar", *J. Phys. Oceanogr.*, *39*, 2230-2246.



Apéndice 1.- Ondas Internas.

La interacción del flujo mareal intenso con la batimetría accidentada de los umbrales, y la fuerte estratificación de la columna de agua origina en el Estrecho una de las más importantes mareas internas del planeta. Sus detalles sólo se explican adecuadamente mediante modelos numéricos de alta resolución.

El salto hidráulico es una estructura que tiende a desplazarse hacia el Mediterráneo pero no puede hacerlo por estar retenido por la corriente mediterránea sobre la que debería avanzar y que en Camarinal es muy intensa cuando está reforzada por el flujo mareal en el periodo de vaciante. A medida que se acerca la pleamar y la corriente de marea se debilita, la corriente total sobre Camarinal desciende por debajo de un cierto valor que permite al salto hidráulico progresar hacia el Mediterráneo. Ocurre 1 ó 2 horas antes de la pleamar.

Si las mareas son muy pequeñas es posible que no llegue a formarse ninguna estructura interna o se formen solo con periodicidad diurna debido a la desigualdad producida por las constituyentes de esta especie. La última causa de la formación y posterior liberación de estas estructuras es la intensidad de corriente sobre el umbral de Camarinal. Para que se formen debe sobrepasarse un cierto valor que suele alcanzarse tras comenzar la fase creciente y para que se liberen posteriormente la velocidad debe disminuir por debajo de otro cierto valor, lo que ocurre poco antes de la pleamar.

Excepto en periodos de mareas muertas, y no en todos, lo usual es que estas estructuras se formen en cada ciclo de marea, es decir, con periodicidad semidiurna. Su formación y subsiguiente liberación son sin duda los hechos más notables de la dinámica mareal.

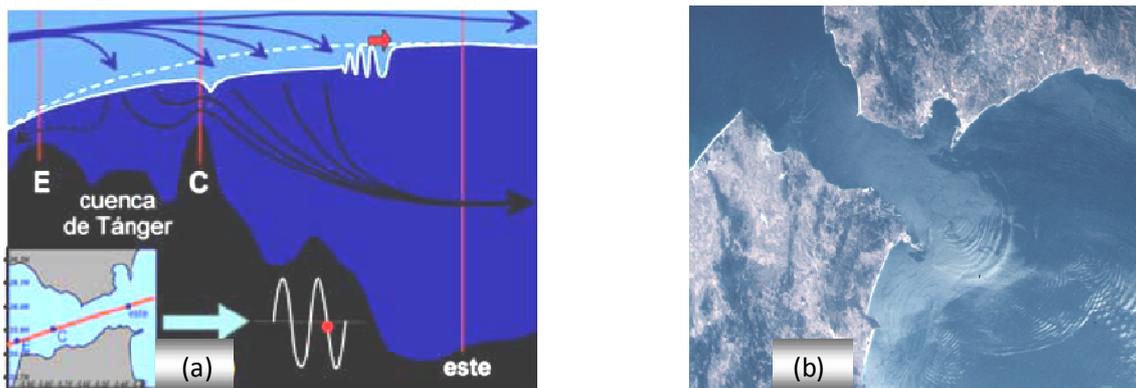


Figura 26.- (a) Flujo mareal atravesando el perfil longitudinal remarcado en línea roja en la figura del recuadro en el ángulo inferior izquierdo. Con la letra E se ha señalado el control de Espartel y con una C el control de Camarinal. En él se observa la formación de ondas internas desplazándose hacia el Mediterráneo. (b) Fotografía del Estrecho de Gibraltar tomada en superficie donde se aprecia la propagación de ondas internas.

Una vez liberadas estas estructuras encuentran en la dirección de avance una interfase relativamente elevada y dejan a su espalda una interfase deprimida. A medida que progresan



Flujos de energía en el Estrecho de Gibraltar. Proyecto FLEGER (RNM-3738).

hacia el Mediterráneo van generando una secuela de ondas internas tras ellas cuya distancia valle–pico puede superar 100 m. El conjunto avanza a $1.5 - 2 \text{ ms}^{-1}$ y emerge en el Mediterráneo entre 8 y 12 horas después de haberse liberado el solitón. Pese a su enorme amplitud interna, estas ondas apenas tienen milímetros de amplitud superficial y no se detectan en los registros de nivel del mar. Sin embargo la interacción de la luz con la rugosidad superficial vinculada al campo de velocidades de la onda produce franjas alternas brillantes y difusas que reproducen bien la estructura básica de la onda y que pueden resultar espectaculares. Los fenómenos vinculados a la marea son un motor importante de productividad biológica al desplazar verticalmente importantes volúmenes de agua con la periodicidad de las mareas. Dos de ellos son de especial relevancia. El primero es el levantamiento periódico que sufre la interfase en la parte oriental del Estrecho durante el semiciclo bajamar-pleamar que aproxima agua mediterránea rica en nutrientes a la superficie. La rotación de la tierra hace que la aproximación sea mayor en la costa norte que es potencialmente más productiva. El segundo de ellos es el flujo vertical neto de nutrientes que se produce en los saltos hidráulicos en las inmediaciones del umbral de Camarinal debido a la fuerte turbulencia y disipación que tiene lugar en esas estructuras.

La energía disipada se utiliza fundamentalmente para mezclar las aguas atlántica y mediterránea, enriqueciendo las primeras más bien pobres en nutrientes, a costa de las segundas. Una parte de esas aguas mezcladas es transportada por la corriente media entrante hacia el interior del Mediterráneo y otra parte arrastrada por el flujo saliente hacia el Atlántico.

Para visualizar el fenómeno de ondas internas hacer click en el siguiente enlace <http://oceano.uma.es/fleger> de la página <http://oceano.uma.es> del grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga.

Agradecimientos.

Este trabajo está financiado por el proyecto FLEGER (RNM-3738) de la consejería de Economía Innovación y Ciencia (Junta de Andalucía).

Agradecemos la participación de Gianmaria Sannino¹ en el desarrollo del modelo de circulación usado en este estudio a partir del cual se han elaborado los mapas, así como a Simone Sammartino² y Javier Delgado² por útiles comentarios y sugerencias.

¹ENEA. *Agencia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (Italia).*

²Grupo de Oceanografía Física de la Universidad de Málaga (GOFIMA).