

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS

TESIS DOCTORAL

**PATRONES DE CIRCULACIÓN OCEÁNICA EN EL
LITORAL ESPAÑOL**

Presentada por: MARÍA LISTE MUÑOZ

**Dirigida por: RAÚL MEDINA SANTAMARÍA
MAITANE OLABARRIETA LIZASO
ALICIA LAVÍN MONTERO**

Junio 2009

CAPÍTULO VII:

Conclusiones generales y futuras líneas de investigación

7.1. Conclusiones Generales

Las conclusiones generales obtenidas a lo largo de esta Tesis, se describen a continuación:

Capítulo I:

A lo largo del capítulo 1 se ha podido constatar que en el océano existen una gran variedad de estructuras con distintas escalas de variabilidad. La interacción entre ellas, hace que el océano sea un sistema muy complejo, que puede ser considerado como un fluido geofísico muy caótico, que muestra una alta variabilidad espacial y temporal. Los modelos de circulación oceánica, se consideran una poderosa herramienta para calcular soluciones aproximadas de las ecuaciones diferenciales parciales que rigen la dinámica de los océanos (Numerical Ocean Circulation Modelling, Haidvogel y Beckmann, 1999). Se ha puesto de manifiesto por tanto, la necesidad de utilizar herramientas numéricas para comprender y predecir la circulación oceánica; éstas herramientas son los modelos de circulación oceánica, capaces de simular tridimensionalmente la evolución temporal de las corrientes, la temperatura y la salinidad del océano.

Capítulo II:

En este capítulo se ha descrito las generalidades del modelo numérico utilizado.

- Es un modelo numérico tridimensional de escala oceánica en diferencias finitas, en el que se asume que el flujo es incompresible, hidrostático y que es válida la aproximación “*rigid-lid*”. En cuanto al esquema numérico, es un modelo parcialmente implícito y totalmente conservativo, en coordenadas-z y utiliza un esquema numérico leapfrog para el tratamiento del paso de tiempo.
- Resuelve el movimiento del flujo, tanto la componente barotrópica como la baroclínica, incluyendo los efectos de la aceleración de Coriolis, la variación de la temperatura por intercambio de calor con la atmósfera, la variación de la salinidad por evaporación y por precipitación y el efecto de la tensión tangencial en superficie por la acción del viento. Como resultado, el modelo proporciona series temporales de salinidad, temperatura y velocidad (componentes vertical y horizontal).
- Las ecuaciones que resuelve el modelo son la ecuación de conservación de la masa (Kundu, 1990), las ecuaciones de Navier Stokes para la conservación de la cantidad de movimiento, la ecuación de conservación de las propiedades escalares (por ejemplo la salinidad) y la ecuación de estado (Wright, D.G. 1996), asumiendo la aproximación hidrostática y la aproximación de Boussinesq.

Capítulo III:

En el capítulo 3 se han descrito las implementaciones realizadas para la puesta a punto del modelo utilizado en esta Tesis, que se pueden de la siguiente manera:

- Se han generado 6 mallas para ejecutar el modelo. Estas mallas tienen diferente resolución y se han interpolado al dominio de estudio del modelo, desde la batimetría proporcionada por la base de datos ETOPO2.
- Una de las aportaciones más importantes en la puesta a punto del modelo MEDiNA, es la realización de un algoritmo de “*anidamiento en doble sentido*” (basado en el método del “*semipronóstico*”), para unir las mallas, cuya característica más notable es el intercambio de datos en ambas direcciones de anidamiento; de esta forma, las mallas que se encuentran anidadas, se ven afectadas entre sí.
- En lo que se refiere a la puesta a punto de la Condición Inicial, el modelo MEDiNA, se inicializa asumiendo una velocidad inicial igual a cero en el instante inicial. Los valores de temperatura y salinidad (media mensual y anual), han sido implementados a partir de los valores extraídos de la base de datos, *WOA 05* (NOAA) para las mallas que comprenden el dominio del Atlántico Norte, y de la base de datos *MEDAR-MEDATLAS* (IFREMER), para el Estrecho de Gibraltar y el Mar Mediterráneo.
- Se han utilizado como forzamientos en la puesta a punto del modelo los datos proporcionados por la base de datos *Hellerman* (NASA) para el viento y se ha aplicado el método de la “*restauración*” para introducir los forzamientos de los flujos de calor y agua dulce al modelo.
- Como Condición de Contorno se ha impuesto en el Norte del modelo la existencia de una plataforma que rompe la circulación, en el Ecuador una capa de absorción con la que se pretende acercar los datos de temperatura y salinidad a los datos proporcionados por la climatología y en el fondo se ha impuesto la condición de no deslizamiento.
- Se ha paralelizado el código que inicialmente era secuencial. Esto ha sido un punto clave ya que ha permitido no solo obtener, sino estudiar y corregir los resultados en un tiempo razonable. De otro modo, hubiese sido inviable efectuar

todas las pruebas que se han realizado para reparar errores o calibrar parámetros, ya que con el modelo secuencial se generaba 1 año de resultados por cada 5 días de ejecución. Por ejemplo, para obtener una serie de 10 años de resultados se hubieran necesitado 50 días, frente a los 25 que se precisan tras la paralelización del código. Se ha conseguido, por tanto, reducir enormemente el tiempo total de cálculo y en este momento se genera 1 año de resultados en tan solo 2,5 días de ejecución.

- Por último, la puesta a punto del modelo concluye con la implementación del formato binario *NetCDF* (cuya extensión es *.nc*), para almacenar los datos generados por el modelo. Se han archivado por un lado para cada mes, todos los datos de la capa superficial de cada una de las mallas con una resolución temporal de 6 horas, y por otro lado, se han guardado también para cada mes, todos los datos en todos los niveles de profundidad para cada una de las mallas (30 niveles), con una resolución temporal de 5 días (medias cada 5 días de cada una de las variables).

Como conclusión final, se puede decir que todas las implementaciones realizadas para la puesta a punto del modelo MEDiNA, han mejorado notablemente y adecuado el modelo para cumplir su objetivo final: simular la circulación oceánica en el Atlántico Norte y el Mar Mediterráneo.

Capítulo IV:

A lo largo del capítulo 4, se han validado los resultados obtenidos a partir del modelo MEDiNA y las principales conclusiones obtenidas son:

- El modelo MEDiNA se ha ejecutado a lo largo de 46 años y se ha generado tras dicha simulación, series temporales de salinidad, temperatura y de las componentes u , v y w de la velocidad. Estas series temporales han sido

almacenadas en ficheros *NetCDF*, con una resolución temporal de 6 horas (datos superficiales), y de 5 días (para todos los niveles de profundidad).

- Para analizar y validar los resultados derivados de la ejecución del modelo MEDiNA, se ha utilizado la Energía Cinética como parámetro identificador del equilibrio dinámico del sistema, y solo una vez alcanzado dicho equilibrio, se han estudiado los resultados obtenidos. El estudio de la evolución temporal de la energía cinética en cada una de las mallas que conforman el modelo MEDiNA, muestra por una parte que la malla GOM, presenta los valores mas altos de energía cinética (entre $200 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ y $790 \text{ cm}^2/\text{s}^2$), mientras que la malla VIS presenta los valores de energía cinética más bajos (entre $0.06 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ y $0.18 \text{ cm}^2/\text{s}^2$).
- El estudio de la evolución temporal de la energía cinética en todo el dominio, muestra que el sistema alcanza el equilibrio después de 11 años de simulación (la lenta estabilización del dominio muestra lo inestable que es la condición inicial), y pone de manifiesto lo que *a priori* no es algo evidente, la estrecha relación, influencia o conexión que existe entre la circulación de lugares tan dispares y separados por miles de kilómetros como son los que conforman el dominio del modelo MEDiNA, así como la gran complejidad e interconexión que existe entre cada una de las mallas y que hace que la circulación y por tanto la energía se transfiera de unas mallas a otras (esto impide que el sistema alcance el equilibrio rápidamente).
- La validación se ha llevado a cabo abordando el estudio y la comparación de los resultados desde varios puntos de vista y en distintas zonas, para de esta manera mostrar la calidad de los resultados en el máximo número de localizaciones posibles dentro del dominio del modelo:

➤ *Cálculo del transporte en los principales canales y estrechos*

Además, para validar los resultados del modelo se ha calculado el transporte en los principales canales y estrechos de la cuenca occidental del Mar Mediterráneo y del Golfo de México, ya que en ellos se producen importantes intercambios de diferentes masas de agua a distintas profundidades: el Estrecho de Gibraltar (5.69° W), el Canal de Ibiza (38.87° N), y el Estrecho de Sicilia (37.2° N), el Canal de Yucatán (22.2°N), el Estrecho de Florida (82° W), y el Pasaje de Windward (20.1° N).

Estrecho de Gibraltar

El caso del Estrecho de Gibraltar se considera especialmente relevante ya que el flujo medio (10 años), tanto de salida (0.8 ± 0.07 Sv), como de entrada (0.9 ± 0.2), a través del mismo, es la fuente generadora de importantes masas de agua como son la MAW y la MOW. Los valores del transporte concuerdan con los mostrados por la bibliografía donde, Bryden et al., (1994), Wu y Hines, (1996), Astraldi et al., (1999), Hopkins (1999), Lafuente et al. (2002) y Sannino et al. (2002), observaron valores de salida de 0.7 Sv y de entrada de 0.8 Sv. Además, otros autores como Bryden and Kinder (1991) observaron valores de salida de 0.88 Sv y de entrada de 0.92 Sv, Tsimplis y Bryden (2000) observaron valores de salida de 0.68 Sv y de entrada de 0.72 Sv y Candela (2001) observó valores de salida de 0.97 Sv y de entrada de 1.01 Sv.

Canal de Ibiza

De igual manera, el Canal de Ibiza se considera importante también debido a que a través de él (además del Canal de Mallorca), se realiza la gran mayoría del intercambio de agua entre el Norte y el Sur de la cuenca occidental mediterránea (Millot, 1999). Se ha podido comprobar que durante los meses de invierno, el agua procedente de Gibraltar se dirige hacia el Este mientras que en verano se extiende hacia el Norte alcanzando el Canal de Ibiza. El transporte que se ha obtenido es de 0.34 ± 0.5 Sv.

Estrecho de Sicilia

A través del Estrecho de Sicilia se realiza todo el intercambio entre la cuenca occidental y la cuenca oriental mediterránea. Se ha podido observar cómo una parte importante de las aguas que atraviesan el Estrecho de Gibraltar, atraviesan también el Estrecho de Sicilia y se dirigen hacia la cuenca oriental, y como el agua de la cuenca oriental atraviesa el Estrecho de Sicilia y penetra en la cuenca occidental. El transporte que se ha obtenido es de 1.4 Sv y concuerda con las observaciones de Astraldi et al. (1999) que observó un transporte de 1.1 Sv y de Beránger et al. (2004) que observó un transporte de 1.01 Sv.

Canal de Yucatán

En los canales y estrechos estudiados en el Golfo de México, los resultados que se muestran son también satisfactorios. El transporte a través del Canal de Yucatán por ejemplo, tiene una importancia decisiva en la formación de la Corriente del Golfo. El flujo medio (10 años) obtenido, 23 Sv, se ajusta a lo observado por diversos estudios realizados en dicha zona (Abascal et al. (2003), Sheinbaum et al. (2002) y Sheinbaum et al. (ROMS/TOMS European Workshop, Grenoble, France, 2008)), que muestran valores de 24 Sv y 23 Sv.

Pasaje de Windward y Estrecho de Florida

De la misma forma, en el estudio realizado tanto para el Pasaje de Windward como para el Estrecho de Florida, se muestra que el flujo medio (10 años) que atraviesa dichas zonas, se ajustan también a los valores proporcionados por la bibliografía; 23.5 Sv para el Estrecho de Florida (Böning et al. (1990), que muestran valores de 23.2 Sv, y por Molinari et al. (1985), Leaman et al. (1987), Schott et al. (1988), Lee et al. (1985) y Larsen y Sanford (1985), que muestran valores todos ellos de entre 20 y 40 Sv todos ellos para el Estrecho de Florida) y de 4.2 Sv para el Pasaje de Windward (Sheinbaum et al., (2008), que muestra valores de 4 Sv (ROMS/TOMS European Workshop, Grenoble, France, 2008)).

Como conclusión final se puede decir que una vez realizada la validación de los resultados obtenidos tras la simulación del modelo MEDINA, tanto a través de la comparación de los mismos con una base de datos de climatologías (*GDP*), como a partir del cálculo del transporte en los principales canales y estrechos del dominio de estudio, los resultados del modelo MEDiNA, presentan una gran calidad y robustez. Se resume a continuación en una tabla (tabla 7.1), la comparación entre los valores obtenidos por el modelo MEDiNA y los valores dados por la bibliografía:

Lugar de estudio	Valores del Modelo MEDiNA	Bibliografía	
		Valores (Sv)	Autores
Estrecho de Gibraltar	entrada $0,8 \pm 0,07$ salida $0,9 \pm 0,2$	entrada 0,7 salida 0,8	Bryden et al. (1994) Wu y Hines (1996) Astraldi et al. (1999) Hopkins (1999) García-Lafuente et al. (2002) Sannino et al. (2002)
		entrada 0,88 salida 0,92	Bryden and Kinder (1991)
		entrada 0,68 salida 0,72	Tsimplis y Bryden (2000)
		entrada 0,97 salida 1,01	Candela (2001)
Canal de Ibiza	hacia el Norte 0,9 hacia el Sur 0,5	hacia el Norte 0,7	Pinot et al. (2002)
		hacia el Sur 0,2	
Estrecho de Sicilia	1,4	1,1	Astraldi et al. (1999)
		1,01	Beránger et al. (2004)
Canal de Yucatán	23	23-24	Abascal et al. (2003) Sheinbaum et al. (2002) Sheinbaum et al. (2008)
Pasaje de Windward	4,2	4	
Estrecho de Florida	23,5	23,2	Böning et al. (1991)
		20-40	Molinari et al. (1985) Leaman et al. (1987) Schott et al. (1988) Lee et al. (1985) Larsen y Sanford (1985)

Tabla 7.1. Comparación de los valores dados por el modelo MEDiNA y los valores mostrados por la bibliografía.

➤ ***Comparación de de la base de datos de climatologías GDP, con los resultados del modelo MEDiNA***

En primer lugar, se han validado los resultados del modelo MEDiNA mediante la comparación de los mismos con una base de datos de climatologías (*GDP*), que proporciona entre otras variables, medias mensuales de velocidad. Tras esta

comparación, se puede decir que los valores de la velocidad obtenidos con el modelo MEDiNA, son un 10.69% inferiores que los de la base de datos GDP. El error absoluto mínimo entre los datos se produce en el mes de julio y es del 5.85% y el error absoluto máximo entre los datos se produce en el mes de febrero y es del 16%. Como ya se ha dicho el error absoluto medio es del 10.69%

Por el contrario, los valores medios anuales son en algunos puntos de la malla son de hasta un 25% superiores a los dados por la base de datos GDP. Se ha atribuido esta sobrestimación puntual de los valores medios anuales así como un ligero desplazamiento de la trayectoria de la corriente en la zona final del arco de islas del caribe, a un mal ajuste de la batimetría en dicha zona.

En cuanto a la trayectoria de la Corriente del Golfo, se puede decir que se ajusta bien, aunque su posición varía existiendo algunas zonas donde el modelo sobreestima y otras zonas donde subestima los valores dados por la base de datos de climatologías (*GDP*). Aunque el ajuste entre los datos del modelo MEDiNA y los datos GDP no es perfecto, se considera satisfactorio ya que las diferencias obtenidas se pueden deber a las propias diferencias que presentan los datos comparados, ya que el modelo MEDiNA utiliza vientos climatológicos, donde la transferencia de momento no es igual que con los vientos reales donde existen picos de intensidad (como los que utiliza la base de datos GDP). Además, las velocidades dadas por el modelo MEDiNA están promediadas en el centro de las capas, mientras que las velocidades de la base de datos GDP son medidas puntuales.

Capítulo V:

En este capítulo, se ha mostrado la capacidad que tiene el modelo MEDiNA para simular la formación y la propagación de la masa de agua MOW (*Mediterranean Overflow Water*), y a continuación se resume de manera general las principales conclusiones obtenidas:

- Para realizar la simulación del flujo de agua mediterránea saliendo hacia el Océano Atlántico, *Mediterranean Overflow Water* (MOW), se han unido las cuencas del Mar Mediterráneo y del Océano Atlántico Norte a través del Estrecho de Gibraltar, y los resultados obtenidos se muestran acordes con los datos proporcionados por la bibliografía existente en dicha zona.
- La MOW se sitúa aproximadamente a una profundidad de equilibrio de 1000 m en el Golfo de Cádiz, fluye alrededor de la Península Ibérica así como del Golfo de Vizcaya, y el hundimiento de su núcleo (con una salinidad mayor de 37.1) se produce a 18° W. De esta manera se demuestra que tiene la capacidad de propagarse tanto en una malla de 1/8° de resolución que comprende la zona este del Atlántico Norte, como en una malla de un 1/16° de resolución, como la malla que engloba el Golfo de Vizcaya.
- La MAW se propaga desde el Océano Atlántico hacia el Este y forma un giro anticiclónico en la parte occidental del Mediterráneo. La tasa de intercambio obtenida es de 0.9 ± 0.2 Sv para el flujo de la MAW y 0.8 ± 0.07 Sv para el flujo de la MOW.
- En este estudio también se ha puesto de manifiesto que la MOW interacciona con una elevación o meseta en su camino hacia el Océano Atlántico, que provoca la división del flujo en dos ramas. La MOW se sitúa cerca del nivel de equilibrio en todas las direcciones, ya que los resultados de la simulación se muestran acordes con las observaciones de la bibliografía (incluso en el punto más angosto del Estrecho de Gibraltar). El modelo MEDiNA, sobrestima los valores de salinidad en el Golfo de Vizcaya. Esto puede ser debido en parte a la condición inicial impuesta, ya que la climatología WOA05 que se utiliza como condición inicial de temperatura y salinidad (ver capítulo 3) en la zona del Golfo de Vizcaya, presenta valores superiores a los dados por la bibliografía.
- Se ha demostrado que un modelo de coordenadas-z es perfectamente capaz de resolver la dinámica multi-cuenca sin asimilación de datos y se ha demostrado también que la configuración actual del modelo es capaz de mantener la

intensidad de las corrientes sin una excesiva dilución, lo que permite el modelado detallado de todas las características de las corrientes de densidad.

- Por lo tanto, se ha conseguido explicar la idea de que los modelos-z no son capaces de modelar adecuadamente las corrientes de densidad, como por ejemplo la MOW. Esta idea se basó en una conclusión prematura ya que se hizo en base a diversos estudios incompletos de modelos-z que se estaban desarrollando en un momento dado como los realizados por Johnson et al. (2002); Dietrich et al. (2004); Legg et al. (2005); Drillet et al. (2005) y Tseng and Dietrich (2006). Hoy día se ha demostrado que los modelos-z son capaces de simular con precisión las corrientes de densidad (Dietrich et al., 2008).
- Además, debido a la correcta simulación del transporte de la MOW se hace posible abordar la dinámica a largo plazo de los efectos (escala de tiempo de décadas o siglos) de la MOW sobre las masas de agua. Dentro de estos efectos se incluye la evolución de las propiedades de las masas de agua del dominio de estudio y para ello se deberá tener en cuenta en futuros trabajos las fuentes naturales de los ríos, la precipitación y evaporación natural, en vez de que dichas fuentes sean derivadas de la climatología como es el caso de este estudio.

Capítulo VI:

Se ha demostrado que tanto los EOF (Empirical Orthogonal Function) como las SOM (Self Organizing Maps), además de ser potentes herramientas estadísticas, son adecuadas para estudiar en este caso, las series temporales de variables oceanográficas obtenidas a partir del modelo MEDiNA, con el fin de obtener patrones de circulación oceánica en el litoral español.

- Se ha aplicado la técnica EOF a las series temporales de 20 años (medias cada 5 días) de las componentes u y v de la velocidad de la corriente superficial en el Mar Mediterráneo y se ha conseguido reducir de manera considerable la

información redundante de los datos analizados con la mínima pérdida de variabilidad, así como relacionar los tres primeros modos (los resultados matemáticos) con las características generales de la circulación oceánica en el Mar Mediterráneo (procesos físicos).

- Se han analizado los resultados simplificados (variaciones temporales de cada uno de los 15 primeros modos obtenidos con EOF) mediante SOM y se ha demostrado como los datos que pertenecen a los mismos meses, se agrupan dentro del mismo patrón o en patrones vecinos. Además, se ha observado que existe la posibilidad de que un mismo patrón represente a datos de meses diferentes.
- Se ha analizado la relación que tienen los patrones de circulación superficial, con los patrones de circulación atmosférica en la cuenca mediterránea y se ha podido observar como los patrones oceánicos presentan diferencias que muestran la variabilidad de los datos. Además, se ha podido ver también que la propia inercia del océano hace que la respuesta del mismo presente diferentes escalas temporales que los forzamientos atmosféricos. Se puede decir por tanto, que la serie temporal del módulo de la velocidad superficial (m/s) analizada presenta una variabilidad que va más allá de la variabilidad marcada por el forzamiento atmosférico.
- Por último, se han mostrado los resultados, mediante el análisis de los patrones de circulación oceánica en el Golfo de Vizcaya. Se ha generado una SOM de dimensión 9x9 y se han obtenido 81 patrones, de los cuales 59, contienen las diferentes situaciones oceánicas con probabilidad de ocurrencia en el Golfo de Vizcaya. A partir de este estudio se ha conseguido detectar automáticamente grupos de patrones similares, en el conjunto de los datos disponible y se ha analizado la relación que tienen los patrones de circulación oceánica con los patrones de circulación atmosférica en el Golfo de Vizcaya. Para ello se ha considerado que los 12 campos de viento utilizados como forzamiento en el Modelo MEDiNA (que repite continuamente el ciclo climatológico anual), se corresponden con los 12 patrones atmosféricos presentes en el Golfo de

Vizcaya. Tras dicho análisis, se ha podido observar que las situaciones oceánicas se encuentran totalmente influenciadas por los vientos superficiales y los patrones que se obtienen son los patrones ligados a las distintas situaciones atmosféricas generales.

7.2. Futuras Líneas de Investigación

Las futuras líneas de investigación que surgen para complementar el trabajo realizado en esta Tesis doctoral, son diversas y se resumen a continuación:

De la sobrestimación puntual de los resultados del modelo MEDiNA en la zona del arco de las islas caribe (antillas menores), así como del desplazamiento de la trayectoria de la corriente en dicha zona, con respecto a los valores y trayectorias dadas por la base de datos GDP, se propone como futura línea de investigación estudiar y corregir las causas que originan dicha sobrestimación y desplazamiento de la trayectoria.

El modelo MEDiNA sobrestima los valores de salinidad en el Golfo de Vizcaya y esto puede ser debido en parte a la condición inicial impuesta (climatología WOA05) por lo tanto se propone como futura línea de investigación, implementar el modelo con una climatología más precisa del Golfo de Vizcaya para subsanar de esta manera la sobrestimación de la salinidad en dicha zona.

Como ya se ha señalado en repetidas ocasiones a lo largo de toda la Tesis, en el modelo MEDiNA, se repite continuamente el ciclo climatológico anual. Aunque se ha demostrado que las series temporales obtenidas, presentan una importante variabilidad, se plantea como futura línea de investigación implementar el modelo MEDiNA con los forzamientos de la base de datos NCEP (datos de reanálisis proporcionados por <http://www.ncep.noaa.gov/>), para generar de esta manera una base de datos de reanálisis de corrientes para todo el dominio del modelo.

Esta línea de investigación, desencadena una revisión de la actual validación realizada en esta Tesis puesto que la transferencia de momento, no es igual con los vientos climatológicos que con vientos obtenidos a partir de un reanálisis, donde existen picos de intensidad. Por lo tanto, se propone como futura línea de investigación validar los datos obtenidos a partir de dicha implementación.

Otra de las líneas de investigación que se proponen en esta Tesis, surge a partir de la correcta simulación del transporte de la MOW (*Mediterranean Overflow Water*), a partir de los datos obtenidos del modelo MEDiNA. Esto hace que sea posible abordar la dinámica a largo plazo de los efectos (escala de tiempo de décadas o siglos) de la MOW sobre las masas de agua. Dentro de estos efectos se incluye la evolución de las propiedades de las masas de agua del dominio de estudio, y para ello se propone como futura línea de investigación, considerar las fuentes naturales de los ríos, la precipitación y evaporación natural, en vez de que dichas fuentes sean derivadas de la climatología como es el caso de esta Tesis.

A lo largo de la Tesis se ha descrito que la MOW tiene una gran repercusión sobre los efectos del clima a gran escala, ya que una vez que alcanza su profundidad de equilibrio (aproximadamente a 1000 m) es la responsable del balance de calor y sal a dicha profundidad en el Océano Atlántico Norte (Barringer y Price, 1997). Se propone por tanto, como futura línea de investigación, acoplar el Mar Mediterráneo, el Océano Atlántico Norte y el Océano Ártico para estudiar con detalle los efectos que la MOW, puede tener sobre las masa de agua del Atlántico Norte, y por tanto sus efectos sobre el Cambio Climático y repercusiones sobre la circulación oceánica general.

Por último se propone como futura línea de investigación el estudio de las reacciones derivadas de los efectos o cambios producidos por la MOW. Tales reacciones pueden ser importantes debido a que, existe energía química más que suficiente en los sedimentos del fondo para fundir todo el hielo de los océanos; los procesos biogeoquímicos de los ecosistemas oceánicos del fondo, pueden oxidar metabolitamente las burbujas de gas metano que se forman cuando los hidratos se disocian en contacto con las corrientes más cálidas (Lai et al., 2005). Estos y otros efectos biogeoquímicos oceánicos producidos por la dinámica de las corrientes marinas,

afectan directamente, por ejemplo, a la distribución de las especies marinas en el océano (Lai, 2006).

