

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 IV:

Validación de Modelo

A lo largo de los capítulos anteriores, se han expuesto los motivos, revisado el estado del arte, planteado la organización y estructura de este documento y se ha descrito el modelo numérico seleccionado, así como su puesta a punto para cumplir los objetivos propuestos en esta Tesis.

El principal objetivo de este capítulo es validar los resultados obtenidos a partir del modelo numérico utilizado. Para ello, se estructura en diversos apartados de forma que el primer apartado, se dedica a la introducción y en él se describe tanto el formato como la manera de almacenar los datos obtenidos tras la simulación y se muestra cómo el sistema ha alcanzado el equilibrio dinámico a partir del cual los resultados pueden ser validados. En el segundo apartado se describe la base de datos de corrientes superficiales obtenida a partir de boyas de deriva (base de datos *GDP*), y se utiliza para comparar con los datos numéricos obtenidos tras la simulación del modelo MEDiNA. En el tercer apartado se calcula el volumen de transporte en canales y estrechos con un flujo neto (medio o climatológico) conocido y se comparan los resultados con los datos proporcionados por la bibliografía. Por último, en el quinto apartado, se realiza un resumen y se exponen las principales conclusiones obtenidas.

4.1 Equilibrio dinámico del sistema

El modelo MEDiNA se ha ejecutado a lo largo de 46 años. Tras esta simulación se ha generado 46 años de series temporales de salinidad, temperatura y de las componentes u , v y w de la velocidad. Para analizar y validar éstos resultados derivados de la ejecución del modelo, se ha utilizado la Energía Cinética como parámetro identificador de la estabilidad dinámica del sistema (Fernández, V., 2004. Numerical

Studies of the Mediterranean Sea Variability. Tesis doctoral, Universidad de las Islas Baleares).

La energía cinética de un cuerpo es la energía que surge en el fenómeno del movimiento, por lo tanto se puede utilizar como indicador de la cantidad de movimiento y se puede expresar como:

$$EK = \frac{1}{2} \rho \sqrt{(u^2 + v^2)} \quad 4.1$$

donde, u y v , son las componentes de la velocidad para los ejes x , e y , respectivamente y ρ , es la densidad del agua.

El motivo por el que se hace necesario identificar cuándo alcanza el sistema el equilibrio dinámico, se debe a que la ejecución del modelo comienza desde un estado de reposo, es decir de desequilibrio, ya que las velocidades iniciales son iguales a cero y la condición inicial de temperatura y salinidad derivada de la WOA (ver capítulo 3), no tiene por qué estar necesariamente en equilibrio dinámico. Sólo cuando el sistema alcanza el equilibrio, se considera estable y a partir de ese momento se pueden utilizar, validar y analizar los resultados obtenidos. Además, el instante en el cual el sistema alcanza el equilibrio se puede utilizar también como *input* para otros modelos o ejecuciones.

Debido al gran área que abarca la zona de estudio y la compleja circulación que en ella se desarrolla, se ha evaluado la energía cinética tanto individualmente para cada malla y para todos los niveles de profundidad, como de forma global para todo el dominio de ejecución y para todos los niveles de profundidad, y se considera en esta Tesis que el sistema ha alcanzado su equilibrio dinámico, cuando las variaciones de la energía cinética no sean significativas (mayores de un 1%) a lo largo del tiempo.

En la figura 4.1 a, se muestra la evolución temporal de la energía cinética a lo largo de los primeros 25 años de ejecución, integrada en todo el dominio para cada una de las diferentes mallas que conforman el modelo MEDiNA. Si se observan los valores de energía cinética que presentan cada una de las mallas, se puede ver cómo la malla

GOM presenta una gran variación, mientras que en la malla VIS la variación es muy pequeña. Esto se puede considerar un buen indicativo de la energía que se pone en movimiento en cada una de las mallas. Por ejemplo, la malla VIS presenta los valores más pequeños de energía cinética de todo el dominio que van desde $0.06 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ hasta los $0.18 \text{ cm}^2/\text{s}^2$, mientras, la malla GOM presenta los valores mayores que van desde los $200 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ hasta los $790 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ (Figura 4.1 a).

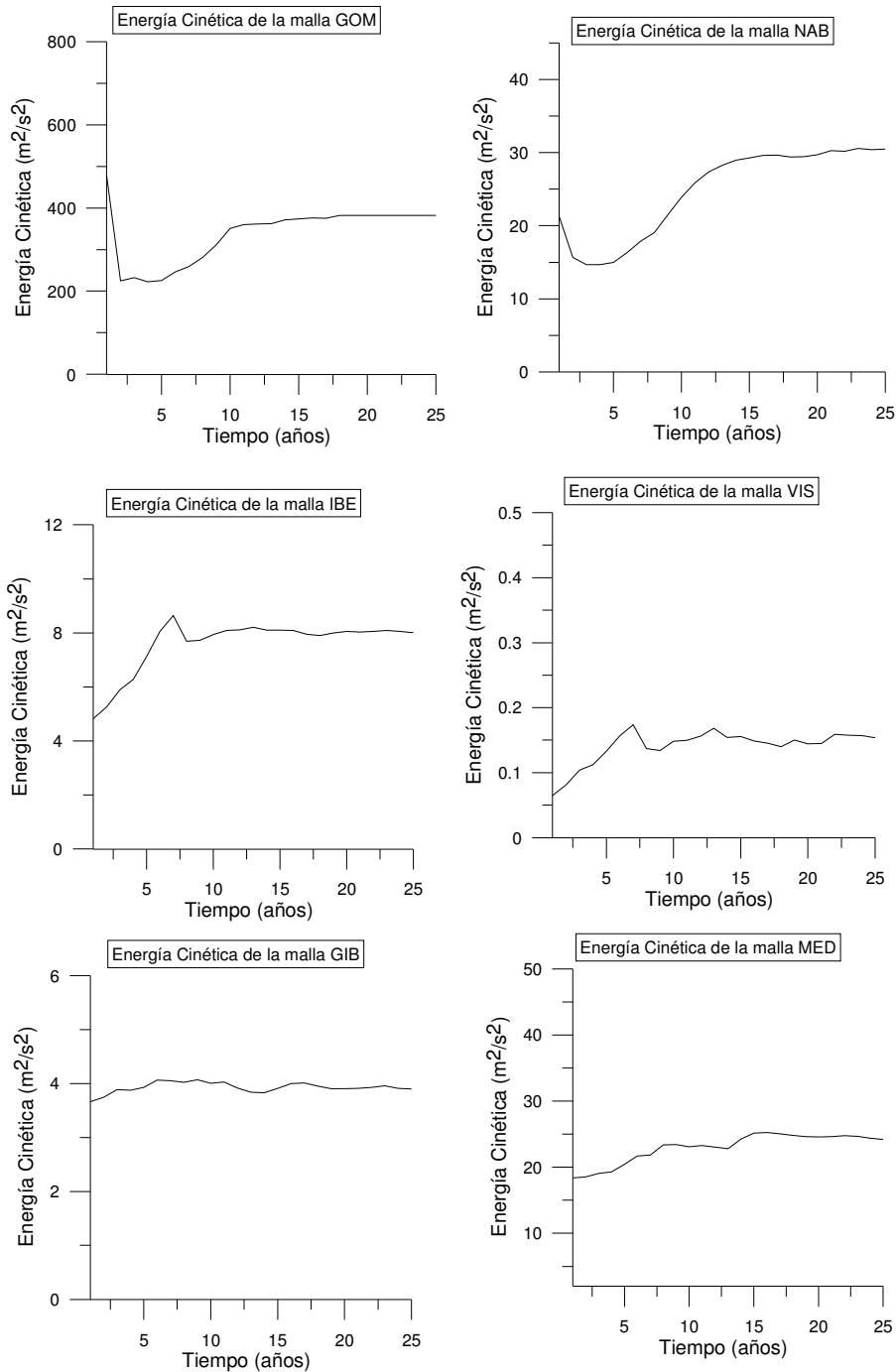


Figura 4.1 a. Energía Cinética (m^2/s^2) de la malla GOM, NAB, IBE, VIS, GIB Y MED.

Si se observa la figura 4.1 b, se puede ver en una misma gráfica la energía cinética de todas las mallas de modelo MEDiNA. La malla GOM es la malla que presenta mayor energía cinética y este comportamiento se debe a que la malla GOM contiene la estructura más energética de todo el dominio del modelo, la Corriente del Golfo.

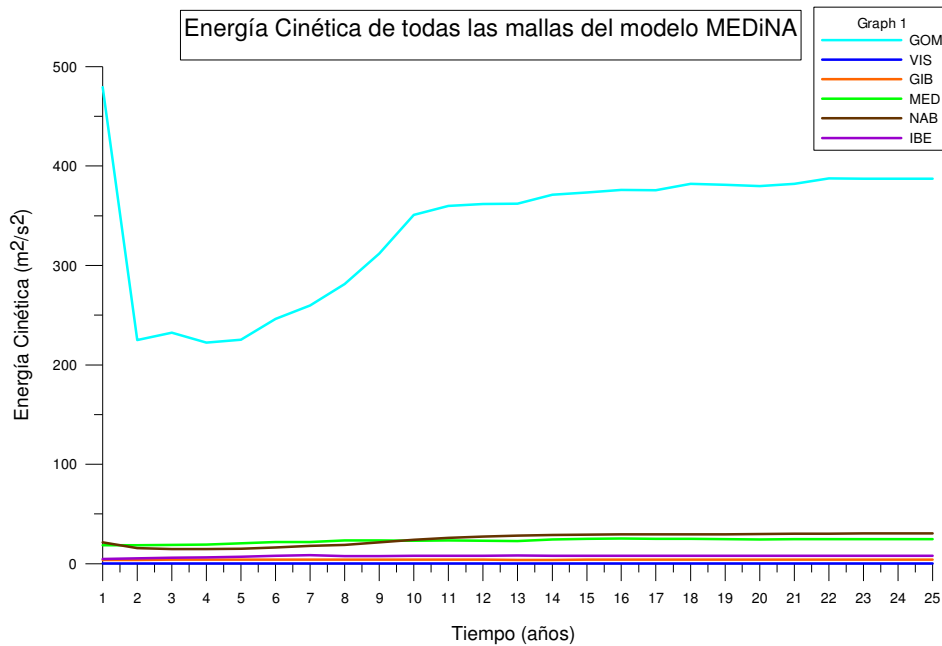


Figura 4.1 b. Energía Cinética (m^2/s^2), de la malla GOM, NAB, IBE, VIS, GIB Y MED.

La figura 4.2, muestra la evolución temporal de la energía cinética a lo largo de lo primeros 25 años de ejecución, en todo el dominio de modelo MEDiNA. En ella se puede ver que de los 25 años de simulación, solo a partir del año 11 se puede considerar el sistema en equilibrio o estabilizado, ya que a partir de ese año no existen variaciones significativas (mayores de un 1%) de la energía cinética.

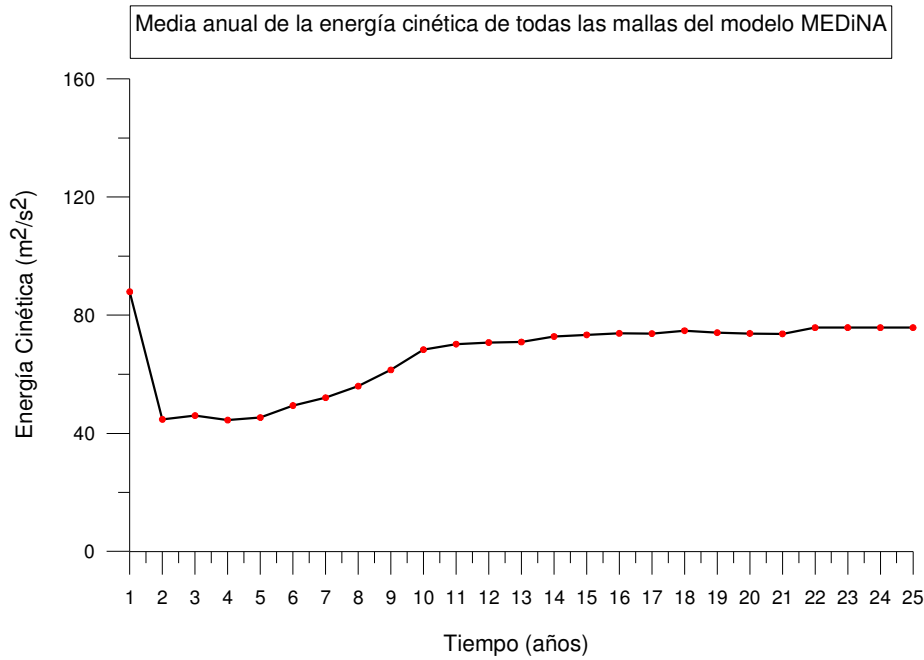


Figura 4.2. Energía Cinética (m²/s²) en todo el dominio de modelo MEDiNA.

Se puede decir por tanto que la lenta estabilización del dominio muestra lo inestable que es la condición inicial. La interconexión existente entre cada una de las mallas, hace que la circulación y por tanto la energía se transfiera de unas a otras y esto impide que el sistema alcance el equilibrio rápidamente.

De esta forma queda patente lo que a priori no es algo evidente, y es la estrecha relación, influencia o conexión que existe entre la circulación de lugares tan dispares y separados por miles de kilómetros como por ejemplo el Golfo de Vizcaya y el Golfo de México.

Una vez alcanzado el equilibrio dinámico en el sistema, los años posteriores de ejecución se consideran adecuados para su estudio y análisis, por lo que se utilizarán para validar los resultados obtenidos.

La validación se enfoca 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 tal y como se muestra a continuación en el siguientes apartados.

4.2. Comparación de los valores del transporte en canales y estrechos.

La comparación entre el volumen de transporte obtenido por el modelo en puntos estratégicos dentro del dominio de estudio y los valores proporcionados por la bibliografía, se considera una forma eficaz de validar los resultados obtenidos.

Para calcular el transporte se ha escogido dentro del dominio del modelo MEDiNA, el Mar Mediterráneo y el Golfo de México ya que ambos lugares presentan una gran cantidad de canales y estrechos estudiados.

Los lugares donde se ha calculado el transporte en el mar Mediterráneo, son los principales canales y estrechos de la cuenca occidental (Figura 4.3), el Estrecho de Gibraltar (5.65° W), el Canal de Ibiza (38.87° N) y el Estrecho de Sicilia (37.2° N), ya que en todos ellos se producen importantes intercambios de diferentes masas de agua a distintas profundidades.

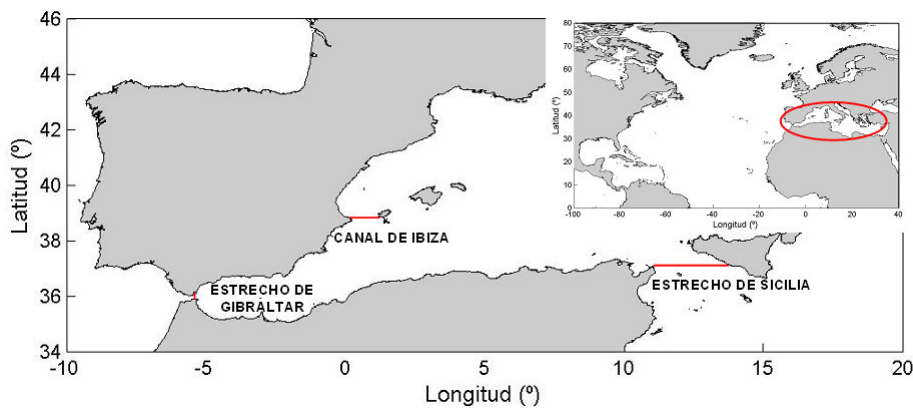


Figura 4.3. Localización de las secciones seleccionadas para calcular el transporte en el Mar Mediterráneo.

En el Golfo de México, el transporte se ha calculado en el Canal del Yucatán (22.2° N), en el Estrecho de Florida (82° W) y en el Pasaje de Windward (20.1° N) (Figura 4.4).

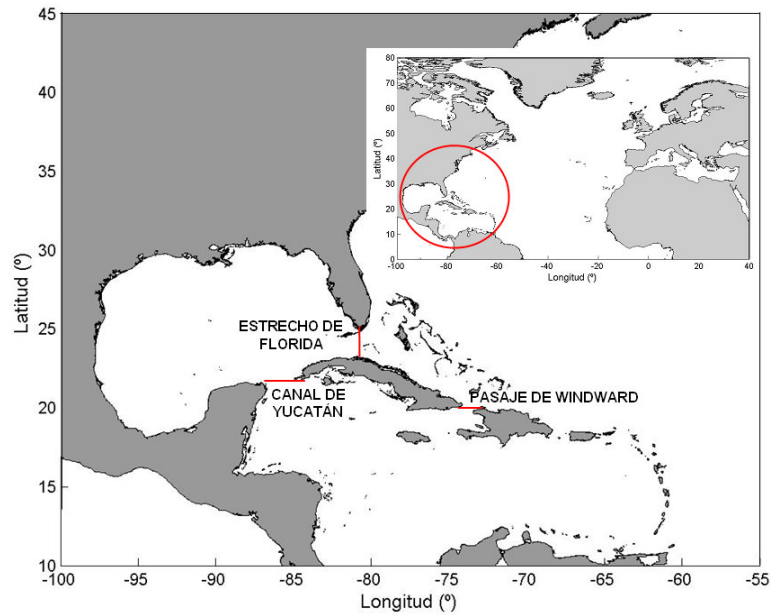


Figura 4.4. Localización de las secciones seleccionadas para calcular el transporte en el Golfo de México.

Estrecho de Gibraltar

El Estrecho de Gibraltar se considera un lugar estratégico para la validación del modelo MEDiNA, ya que a través de él se produce la entrada del agua Atlántica en el Mediterráneo (MAW), y la salida del agua Mediterránea hacia el Atlántico (MOW).

En la figura 4.5, se muestra una sección vertical de la salinidad en el Estrecho de Gibraltar (5.65° W), donde se pueden distinguir las masas de agua ahí presentes. En la parte superior de la figura se puede observar el agua menos salada en color azul (MAW) y la parte inferior de la figura se puede ver el agua más salada en color rojo (MOW). Además, en la figura 4.5 se observa que la interfaz entre la MOW y la MAW se sitúa entre los 100 y los 200 m de profundidad. Estos rangos coinciden con los observados por Tintoré et al., 1988 (50-200m de profundidad).

El agua Atlántica (MAW), se sitúa por tanto en las capas superiores mientras que el agua Mediterránea (MOW), se encuentra en las capas más profundas del Estrecho de Gibraltar. Se puede señalar también que la interfaz es más gruesa, más profunda y menos salada, en el extremo Oeste del Estrecho de Gibraltar. Esto coincide con las

observaciones realizadas por Bray et al., 1995 (sitúa la interfaz entre los 60-100m de profundidad).

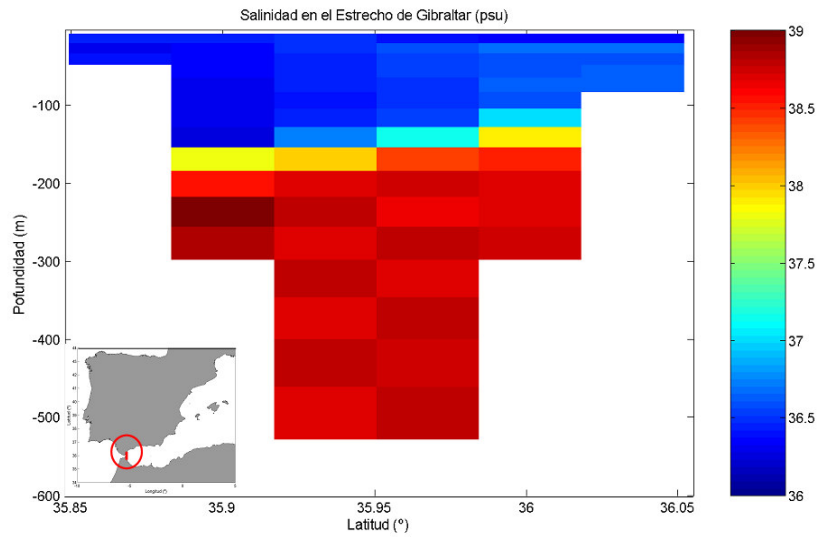


Figura 4.5. Sección vertical (5.65° W) de la salinidad en el Estrecho de Gibraltar (Mes de Julio) obtenida a partir de los resultados del modelo MEDiNA.

Si se observa la figura 4.6, donde se muestra un perfil de salinidad (correspondiente a las coordenadas 39.5°N, 5.65°W), en el Estrecho de Gibraltar, se puede ver que la interfaz entre la MAW y la MOW se sitúa entre 60 y 200 m y presenta un fuerte gradiente vertical de salinidad.

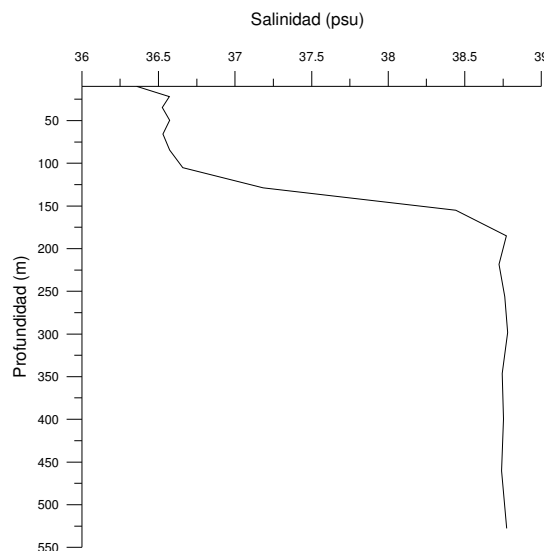


Figura 4.6. Perfil de salinidad en el Estrecho de Gibraltar (39.5°N, 5.65°W) (Mes de Julio) obtenido a partir de los resultados del modelo MEDiNA.

En la figura 4.7 se muestra la salinidad superficial, del Mediterráneo y del Estrecho de Gibraltar. En dicha figura se puede observar cómo la MAW que se propaga por todo el Mediterráneo, forma una capa superficial que se caracteriza por el aumento de salinidad debido a la evaporación y a la mezcla, desde 36-36.5 en el Estrecho de Gibraltar hasta 38.0-38.3 en el Norte del Mar Mediterráneo occidental (Millot, 1999)

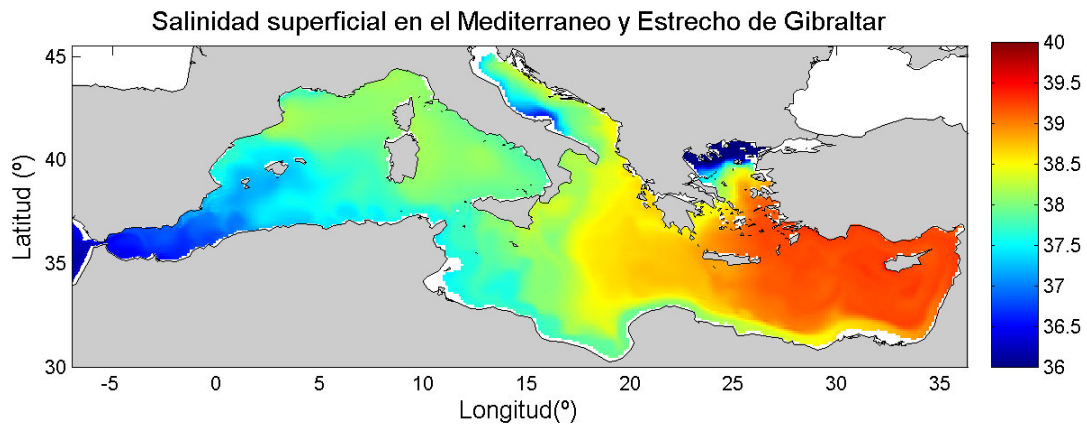


Figura 4.7. Salinidad superficial, del Mediterráneo y Estrecho de Gibraltar (Mes de Diciembre) obtenida a partir de los resultados del modelo MEDiNA.

La figura 4.8, muestra la evolución temporal de la magnitud de la corriente que cruza la sección seleccionada en el Estrecho de Gibraltar tanto para el flujo de entrada desde el Atlántico hacia el Mediterráneo (figura 4.8 a), como para el flujo de salida del Mediterráneo hacia el Atlántico (figura 4.8 b) en el año 72 de la ejecución. El transporte se ha calculado de manera independiente (es decir, el flujo de entrada se ha calculado por un lado y el flujo de salida por otro), a partir de las velocidades perpendiculares a la sección, por lo tanto las velocidades positivas muestran el sentido del transporte hacia el Este o un flujo de entrada en el Estrecho, mientras que las velocidades negativas se corresponden con un sentido del transporte hacia el Oeste o un flujo de salida del Estrecho.

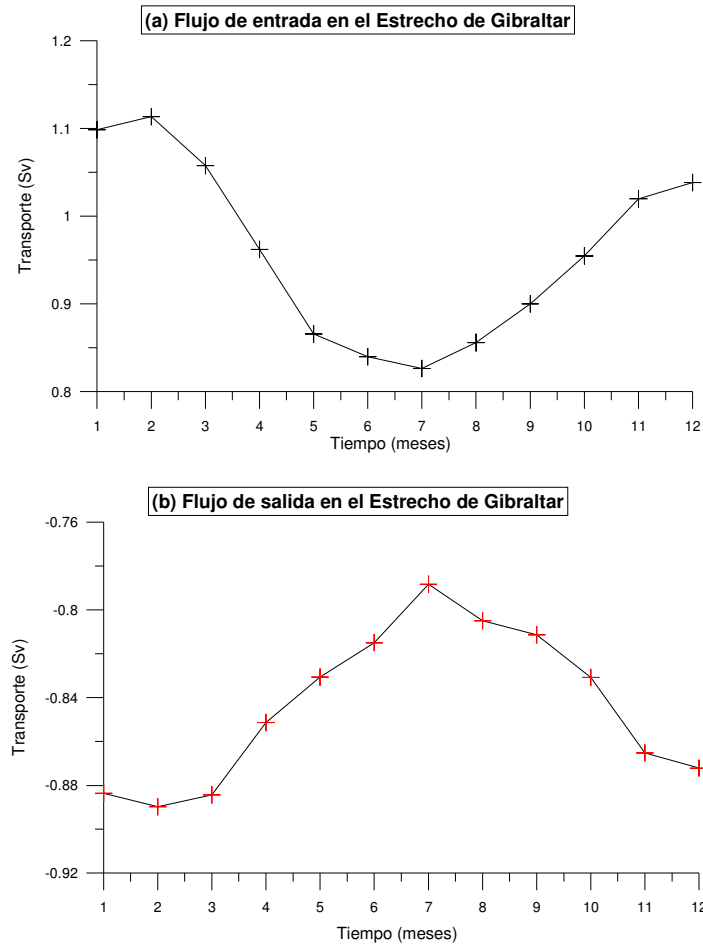


Figura 4.8. (a) Flujo de entrada (Sv) en el Estrecho de Gibraltar. (b) Flujo de salida (Sv) en el Estrecho de Gibraltar.

La figura 4.8 a, muestra el flujo de entrada a través del Estrecho de Gibraltar a lo largo de un año. El flujo de entrada alcanza los valores máximos en los meses de enero, febrero y marzo y los valores mínimos en los meses de junio y julio.

Por el contrario, la figura 4.8 b, muestra que el flujo de salida es mínimo en los meses de julio, agosto y septiembre mientras que alcanza su máximo en los meses de febrero y marzo.

Tras 11 años de simulación se produce un flujo de salida hacia el Oeste de aproximadamente 0.8 ± 0.07 Sv, la MOW, a través del Estrecho de Gibraltar (Figura 4.9). Por encima de este flujo de salida, se sitúa la MAW, o flujo de entrada a través del Estrecho que se dirige hacia el Este con un transporte aproximado de 0.9 ± 0.2 Sv.

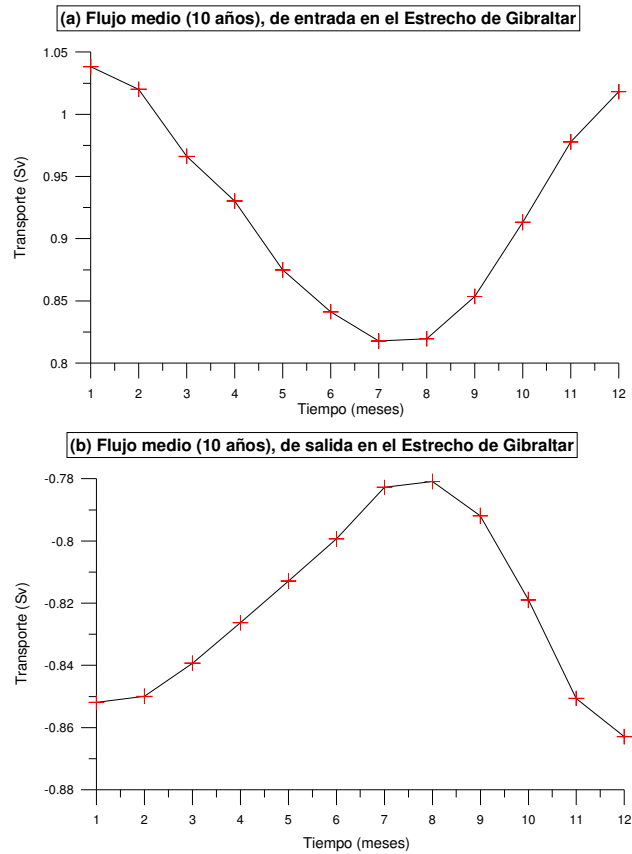


Figura 4.9. (a) Flujo medio (10años), de entrada (Sv) en el Estrecho de Gibraltar. (b) Flujo medio (10años), de salida (Sv) en el Estrecho de Gibraltar.

En la tabla 4.1 se muestran los valores (en Sv), deducidos por diferentes autores tanto para el flujo de agua Atlántica (MAW), como el flujo de agua Mediterránea (MOW), que atraviesa el Estrecho de Gibraltar. Los valores obtenidos por el modelo MEDiNA y que se muestran en las figuras anteriores (figura 4.8 y 4.9), se encuentran dentro del orden de magnitud de los valores del flujo que cruza el Estrecho de Gibraltar (ver tabla 4.1).

Autores	MAW (Sv)	MOW (Sv)
Bryden, Candela, & Kinder, (1994)	0,8	0,7
Wu & Haines, (1996)		
Astraldi et al., (1999)		
Hopkins, (1999)		
Lafuente et al., (2002)		
Sannino, Bargagli, & Artale, (2002)	0,92	0,88
Bryden and Kinder, (1991)	0,72	0,68
Tsimplis & Bryden, (2000)	0,78	0,67
Bryden, (2000)	1,01	0,97
Candela (2001)		

Tabla 4.1. Valores en Sv (dados por diferentes autores), del flujo de la MAW que atraviesa el Estrecho de Gibraltar y de la MOW que atraviesa el Estrecho de Gibraltar.

La figura 4.10 muestra la diferencia entre el flujo medio (10 años), de entrada menos el de salida, a través del Estrecho de Gibraltar. Aunque el flujo medio es siempre positivo, es decir, durante todos los meses del año entra más agua desde el Atlántico hacia el Mar Mediterráneo de la que sale desde el Mar Mediterráneo hacia el Atlántico, se puede observar que en los meses de enero, febrero y diciembre el flujo de entrada es máximo, mientras que en julio y agosto alcanza su mínimo.

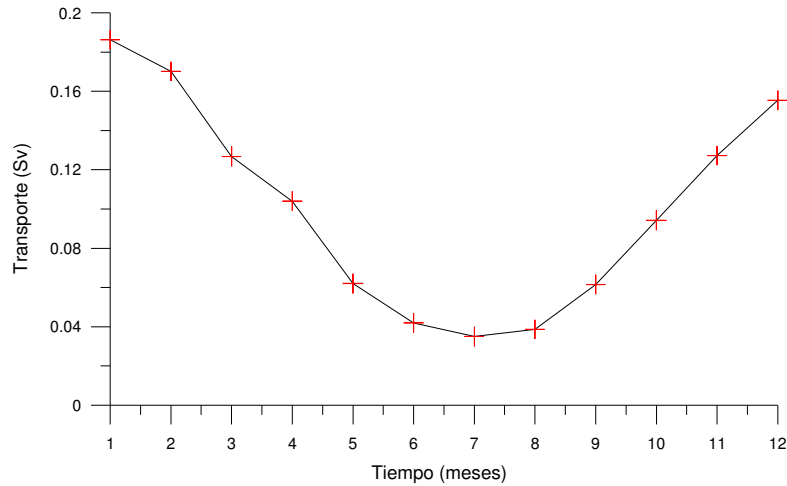


Figura 4.10. Resta del flujo de entrada menos el flujo de salida (Sv), en el Estrecho de Gibraltar.

La resta del flujo medio de 10 años (± 0.09) representa el total del flujo a través del Estrecho del Gibraltar hacia el Mar Mediterráneo, cuyo promedio a largo plazo sostiene el balance entre las fuentes de evaporación-precipitación y la descarga de los ríos (Dietrich et al., 2004b), y mantiene de esta forma el nivel de la superficie del Mar Mediterráneo.

Como conclusión se puede decir que la media temporal del transporte del flujo de salida es de alrededor de 0.8 ± 0.07 Sv y que es la fuente generadora de la MOW. Por otra parte la media temporal del transporte del flujo de entrada es ligeramente superior (0.9 ± 0.2 Sv), y es la fuente que genera la MAW en el Mar Mediterráneo.

Canal de Ibiza

Al igual que el Estrecho de Gibraltar, el Canal de Ibiza se considera importante para la validación del modelo MEDiNA debido a que a través de él (además del Canal de Mallorca), se realiza la gran mayoría de intercambio de agua entre el Norte y el Sur de la cuenca occidental mediterránea (Millot, 1999), ya que una parte importante de las aguas superficiales e intermedias procedentes del Norte de la cuenca occidental mediterránea, atraviesan el Canal de Ibiza y se dirigen hacia el Mar de Alborán y al mismo tiempo, desde el Sur se produce la intrusión del agua procedente de la cuenca argelina (Millot, 1999; Pinardi y Masetti, 2000).

En la figura 4.11, se muestra una sección vertical de la salinidad, en el Canal de Ibiza (38.87° N), en el mes de julio, donde se pueden distinguir las masas de agua presentes. Las capas superiores se encuentran ocupadas por agua menos salina y a medida que la profundidad aumenta, lo hace también la salinidad del agua.

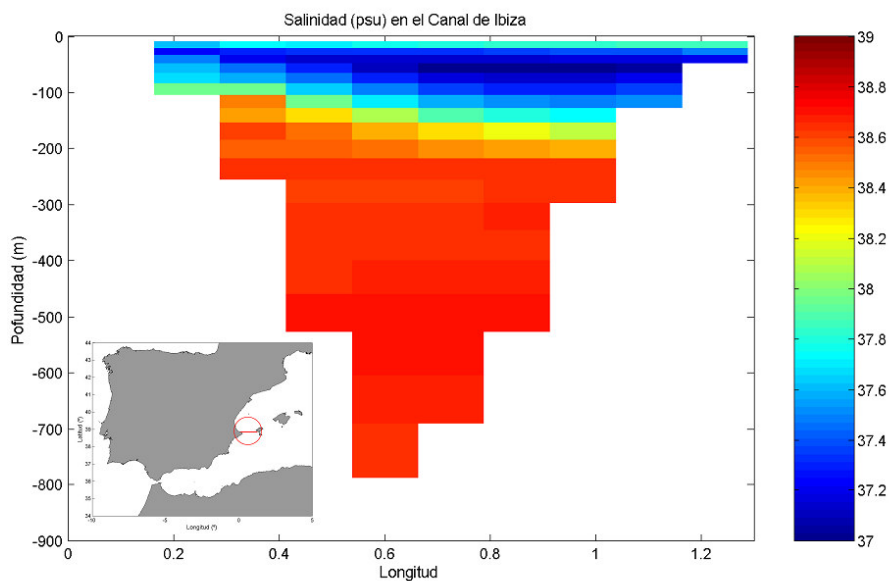


Figura 4.11. Sección vertical de la salinidad en el Canal de Ibiza (38.87° N), (Mes de Julio), obtenida con los resultados del modelo MEDiNA.

Si se observa la figura 4.12, donde se muestra un perfil de salinidad (correspondiente a la posición 38.87° N, 0.66° E) en el canal de Ibiza, se puede ver como en los primeros metros de la columna de agua la salinidad disminuye hasta llegar aproximadamente a los 50 m de profundidad donde la salinidad alcanza su mínimo

(37.05). A partir de ese momento la salinidad aumenta rápidamente hasta llegar a los 200 m de profundidad. Esto, unido al gráfico que se muestra en la figura 4.11, indica que la MAW se sitúa en el canal de Ibiza en los primeros 50 m de profundidad.

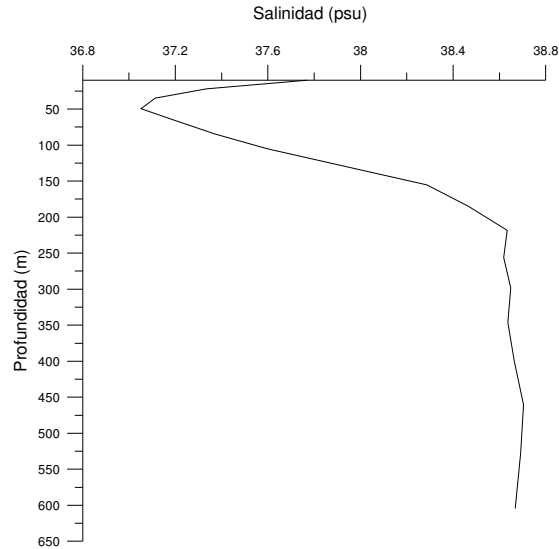


Figura 4.12. Perfil de salinidad en el Canal de Ibiza (38.87° N, 0.66° E) (Mes de Julio), obtenido a partir de los resultados del modelo MEDiNA.

La figura 4.13, muestra la evolución temporal de la magnitud de la corriente que cruza la sección seleccionada en el Canal de Ibiza y al igual que en el Estrecho de Gibraltar, en el Canal de Ibiza el transporte se ha calculado a partir de las velocidades perpendiculares a la sección considerada y en este caso, las velocidades positivas indican un sentido del transporte hacia el Norte, mientras que las velocidades negativas indican un sentido del transporte hacia el Sur.

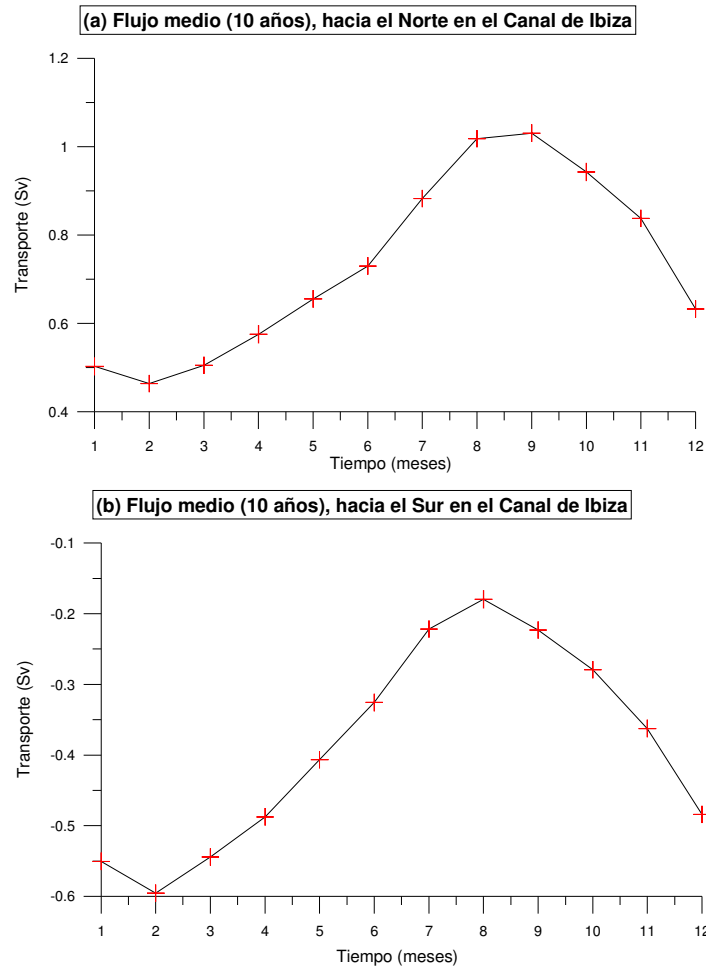


Figura 4.13. (a) Flujo hacia el Norte (Sv) en el Canal de Ibiza. (b) Flujo hacia el Sur (Sv) en el Canal de Ibiza.

En la figura 4.13 (b), se puede ver que el transporte hacia el Sur a través del Canal de Ibiza es máximo en los meses de invierno (enero, febrero y marzo), y que se encuentra en fase con el transporte hacia el Norte que es mínimo en los meses de invierno y más bajo que el transporte hacia el Sur. Esto indica que solo una pequeña fracción de las corrientes que se dirigen al Sur, cruza el Canal de Ibiza mientras que la mayoría de las corrientes recircula hacia el Norte.

La entrada de aguas superficiales con salinidad igual o inferior a 37.5 en julio es de aproximadamente de 0.9 Sv y de 0.5 Sv en invierno. Estos valores se pueden asociar con la entrada de aguas atlánticas de la cuenca Argelina hacia el Norte de la cuenca occidental mediterránea y son cercanos a los valores dados por Pinot et al., 2002, para el transporte hacia el Norte (0.7-0.2 Sv, respectivamente).

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. Esta afluencia de agua menos modificada del Atlántico presenta también una variabilidad interanual observada por datos *in-situ* e imágenes de satélite (Pinot et al., 2002), pero los mecanismos físicos responsables de esta variabilidad son todavía desconocidos (pueden estar relacionados con la oceanografía de las cuenca argelina o con las condiciones atmosféricas en el norte de la cuenca).

La figura 4.14 muestra la diferencia entre el flujo medio (10 años), hacia el Norte menos el flujo medio (10 años), hacia el Sur a través del Canal de Ibiza. El flujo medio es negativo en los meses de enero, febrero y marzo, lo que indica que durante estos meses el flujo medio se dirige hacia el Sur. El resto de los meses del año el flujo se dirige hacia el Norte y alcanza su máximo en agosto (0.83 Sv).

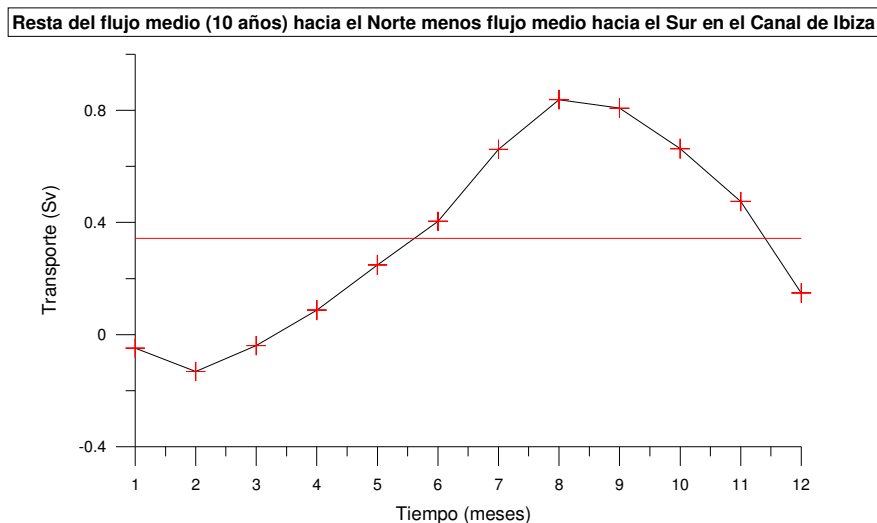


Figura 4.14. Resto del flujo medio (10 años), hacia el Norte menos el flujo medio (10 años), hacia el Sur en el Canal de Ibiza.

En la figura 4.14 se muestra la media temporal del flujo neto que atraviesa el Canal de Ibiza (línea roja), que es de aproximadamente 0.34 ± 0.5 Sv.

Estrecho de Sicilia

El Estrecho de Sicilia se considera un lugar importante para validar los resultados del modelo MEDiNA, debido a que a través de él se realiza todo el intercambio de agua entre la cuenca Oeste y la cuenca Este del Mediterráneo (Pinardi y Masetti, 2000; Larnicol et al., 2002). 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 del Mediterráneo. Al mismo tiempo, desde dicha cuenca se produce la intrusión de agua hacia la cuenta occidental (Millot, 1999).

En la figura 4.15, se muestra una sección vertical de la salinidad en el Estrecho de Sicilia (37.2° N) en el mes de julio, donde se pueden distinguir las masas de agua ahí presentes. Las capas superiores se encuentran ocupadas por agua con una salinidad baja 37.5-38, agua atlántica modificada (MAW) y a medida que la profundidad aumenta, lo hace también la salinidad del agua llegando a alcanzar 38.5. Esta salinidad corresponde al agua intermedia levantina (LIW) que ocupa toda la parte inferior del Estrecho de Sicilia (Stansfield et al., 2003; Béranger et al., 2005).

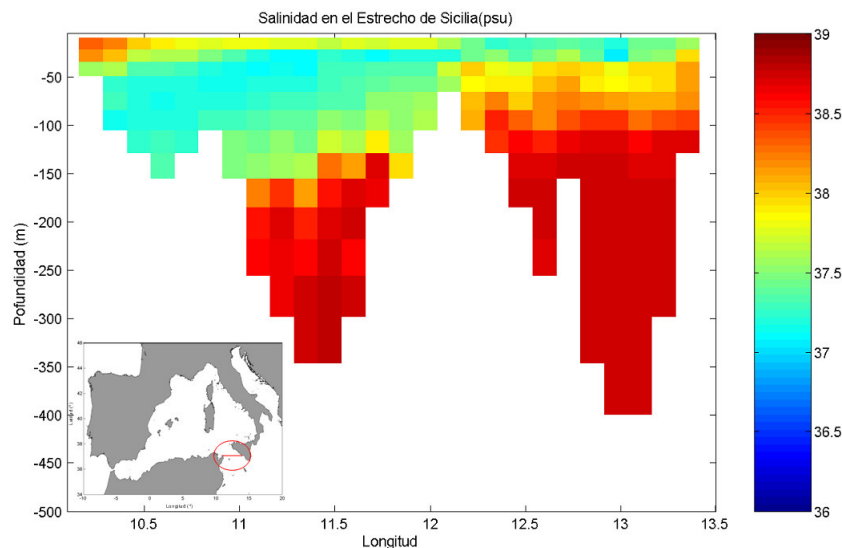


Figura 4.15. Sección vertical de la salinidad en el Estrecho de Sicilia (37.2° N), (Mes de Julio), obtenida a partir de los datos del Modelo MEDiNA.

La figura 4.16, muestra la evolución temporal de la magnitud de la corriente que cruza la sección seleccionada en el Estrecho de Sicilia. De la misma forma que en el Canal de Ibiza, el transporte se ha calculado a partir de las velocidades perpendiculares

a la sección considerada y en este caso, las velocidades positivas indican un sentido del transporte hacia el Norte (se denominará también transporte hacia la cuenca oeste del mediterráneo), mientras que las velocidades negativas indican un sentido del transporte hacia el Sur (se denominará también transporte hacia la cuenca Este de Mediterráneo).

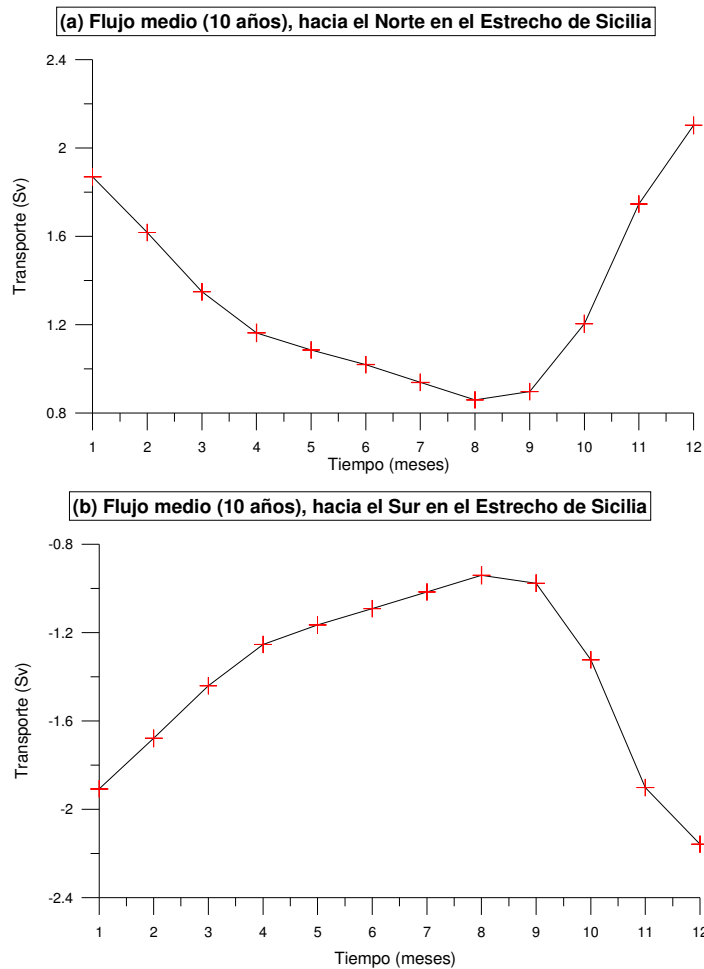


Figura 4.16. (a) Flujo hacia el norte (Sv) en el Estrecho de Sicilia. (b) Flujo hacia el Sur (Sv) en el Estrecho de Sicilia.

En la figura 4.16 (b), se puede observar como la media del transporte anual que cruza el Estrecho de Sicilia y se dirige hacia la cuenca Este es de 1.4 Sv (Astraldi et al., 1999, observó un transporte de 1.1 Sv y Beránger et al., 2004 uno de 1.01 Sv), con un ciclo estacional que va desde 2.15 Sv de intercambio máximo en el mes de diciembre, hasta un transporte mínimo de 0.94 Sv en el mes de agosto. Dicho transporte es principalmente de agua atlántica modificada (MAW), que se dirige muy cerca de la costa de Túnez hacia la cuenca Este mediterránea (Béranger et al., 2005).

De la misma forma, el transporte hacia la cuenca Oeste del mediterráneo (figura 4.16 (a)), consiste principalmente en que el agua intermedia levantina (LIW), atraviesa el Estrecho de Sicilia por la parte inferior de la sección con un máximo en el mes de diciembre (2.10 Sv) y un mínimo en el mes de agosto (0.85 Sv).

En la figura 4.17 se muestran los valores de la diferencia entre el flujo medio (10 años), hacia el Norte (cuenca oeste), menos el flujo medio (10 años), hacia el Sur (cuenca este), a través del Estrecho de Sicilia. El flujo medio siempre es negativo, esto quiere decir que durante todos los meses del año entra más agua en la cuenca Este del mediterráneo (flujo hacia el Sur), que el agua que sale hacia la cuenta Oeste (flujo hacia el Norte).

Puesto que este modelo no considera ni fuentes ni sumideros de agua dulce, se puede esperar un transporte equivalente hacia el Norte para compensar el transporte hacia el Sur y que el volumen neto de transporte sea igual a cero. En este caso, existe un mayor transporte hacia el Sur, un flujo medio de 0.09 Sv más que hacia el Norte.

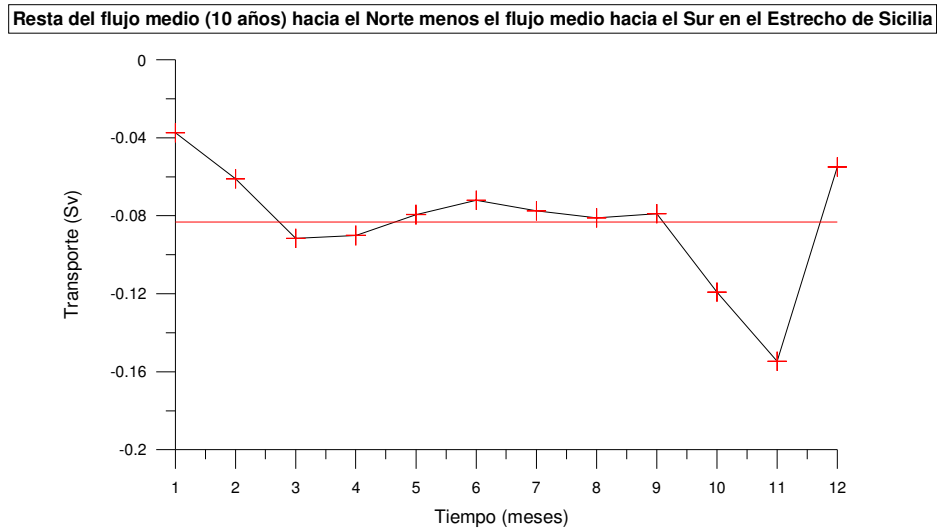


Figura 4.17. Resta del flujo medio (10 años), hacia el Norte menos el flujo medio (10 años), hacia el Sur en el Estrecho de Sicilia.

Canal de Yucatán

El Canal de Yucatán es el punto de conexión entre el Mar Caribe y el Golfo de México. El flujo a través de él tiene una gran importancia local ya que influye en la circulación en el Golfo de México y en la formación (junto a la Corriente de Lazo), de la Corriente del Golfo, por eso, se considera una zona de gran interés para validar los resultados obtenidos con el modelo MEDiNA.

En la figura 4.18, se muestra una sección vertical de la salinidad en el Canal de Yucatán (21.35° N), donde se pueden distinguir las masas de agua ahí presentes. La capa superficial está compuesta por agua de salinidad 35.94 (agua del Caribe procedente del Atlántico Sur). En las siguientes capas se puede observar el agua Subtropical Subsuperficial del Caribe (AsTSsC), con una salinidad aproximada de 36.1.

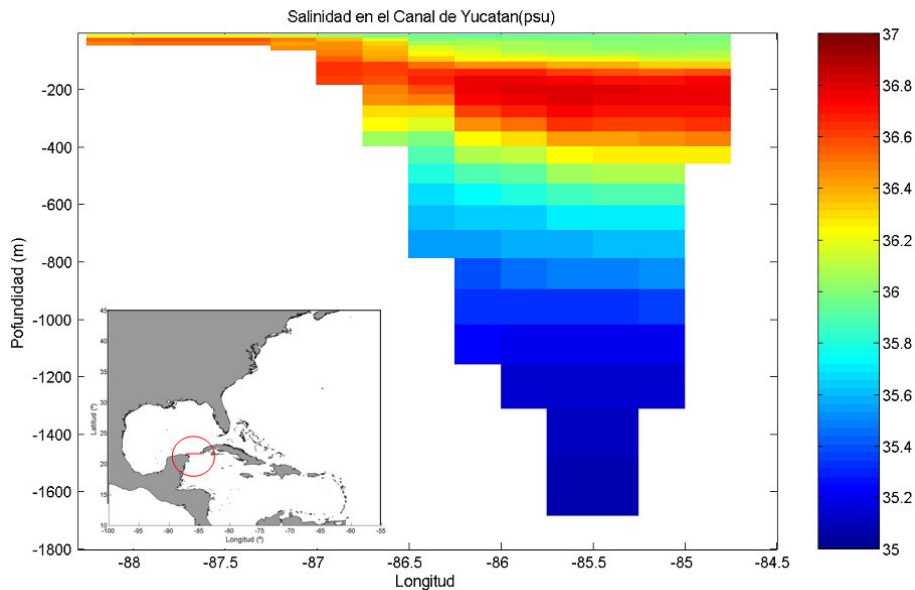


Figura 4.18. Sección vertical de la salinidad en el Canal de Yucatán (21.35°N), en el mes de Julio.

Si se observa la figura 4.19, donde se muestra un perfil de salinidad (correspondiente a las coordenadas 21.35° N, -85.5° E.), en el Canal de Yucatán, y la figura 4.18, se puede ver que entre los 250 y los 750 m aparece Agua Central del Atlántico Noroccidental (NACW), (Gallegos y Czitrom, 1997), cuyos valores de salinidad van desde 35.6 a 35.8. Entre 750 y 950 m aparecen remanentes del Agua Intermedia Antártica (AIA), con un mínimo de salinidad alrededor de 35.3. A mayores

profundidades, el Golfo es ocupado por agua Profunda Noratlántica (APNA), (Vidal et al., 1992).

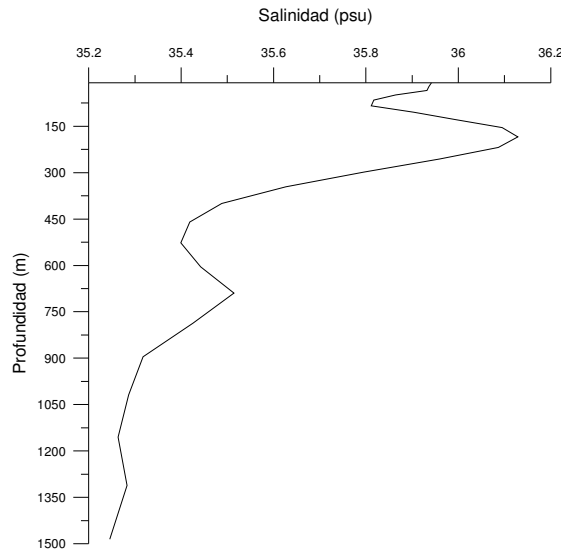


Figura 4.19. Perfil de salinidad en el Canal de Yucatán (21.35° N, 85.5° W) (Mes de Julio).

La figura 4.20, muestra la diferencia entre el flujo medio (10 años) hacia el Norte menos el flujo medio (10 años), hacia el Sur en el Canal de Yucatán. Al igual que en el resto de canales y estrechos, el transporte se ha calculado de manera independiente (es decir, el flujo hacia el Norte se ha calculado por un lado y el flujo hacia el Sur por otro), a partir de las velocidades perpendiculares a la sección considerada y en este caso, las velocidades positivas indican un sentido del transporte hacia el Norte, mientras que las velocidades negativas indican un sentido del transporte hacia el Sur.

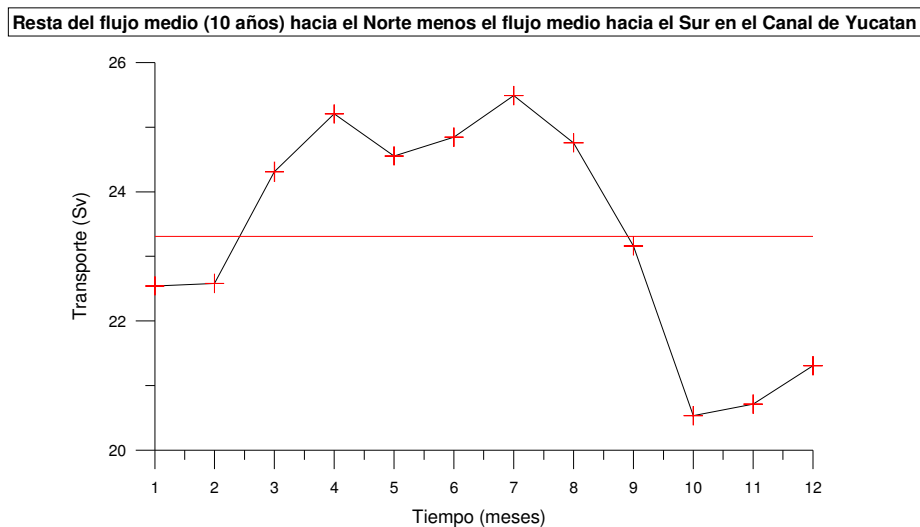


Figura 4.20. Resta del flujo medio (10 años) hacia el Norte (Sv), menos el flujo medio (10 años) hacia el Sur (Sv), en el Canal de Yucatán.

En la figura 4.20, se puede observar cómo los valores netos son siempre positivos, lo que indica que durante todos los meses del año el flujo medio se dirige hacia el Norte. El valor medio neto es de 23 Sv aproximadamente (línea roja). Este valor se corresponde por lo observado por otros autores como 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 respectivamente en el Canal de Yucatán.

Pasaje de Windward

El Pasaje de Windward se considera un lugar estratégico para la validación del modelo MEDiNA, por ser uno de los estrechos (dentro del arco de islas del Caribe) que conecta el Océano Atlántico y el Mar Caribe.

La figura 4.21, muestra el valor neto del flujo medio (10 años) hacia el Norte menos el flujo medio (10 años) hacia el Sur en el Pasaje de Windward. Al igual que en el resto de canales y estrechos, el transporte se ha calculado de manera independiente (es decir, el flujo hacia el Norte se ha calculado por un lado y el flujo hacia el Sur por otro), a partir de las velocidades perpendiculares a la sección considerada y en este caso, las velocidades positivas indican un sentido del transporte hacia el Norte, mientras que las velocidades negativas indican un sentido del transporte hacia el Sur.

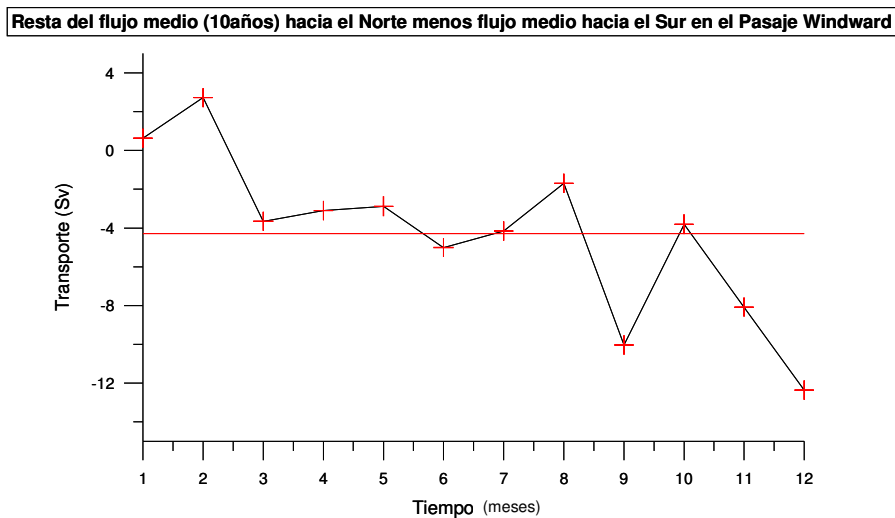


Figura 4.21. Resta del flujo medio (10 años) hacia el Norte (Sv), menos el flujo medio (10 años) hacia el Sur (Sv), en el Pasaje de Windward.

En la figura 4.21, se puede ver como los valores netos son positivos en los meses de enero y febrero y negativos en el resto de los meses. Esto indica que durante los dos primeros meses el flujo medio se dirige hacia el Norte y el resto de los meses el flujo medio es hacia el Sur. El valor neto medio de la resta es de 4,2 Sv hacia el Sur aproximadamente (línea roja). Este valor se corresponde por lo observado por otros autores como Sheinbaum et al., (2008), que muestra valores de 4 Sv (ROMS/TOMS European Workshop, Grenoble, France, 2008).

Estrecho de Florida

El Estrecho de Florida (82° W), se considera el punto geográfico desde donde parte la Corriente del Golfo. El flujo a través de él, la Corriente de Florida, tiene gran importancia ya que influye directamente en todo el sistema circulatorio que comprende la Corriente del Golfo (Leaman et al., 1986).

Diversos autores han medido la Corriente de Florida a partir de dos puntos de control. El primero de ellos es el Estrecho de Florida, que separa la Península de Florida de la Isla de Cuba y el segundo, es el Estrecho que separa la Península de Florida de la Isla Gran Bahama (ver figura 4.22). En este estudio se compara de la misma manera el flujo medio que atraviesa el Estrecho de Florida y el flujo medio que atraviesa el Estrecho de la Isla Gran Bahama.

Al igual que en el resto de canales y estrechos, el transporte en el Estrecho de Florida se ha calculado de manera independiente (es decir, el flujo hacia el Este se ha calculado por un lado y el flujo hacia el Oeste por otro), a partir de las velocidades perpendiculares a la sección considerada y en este caso, las velocidades positivas indican un sentido del transporte hacia el Este, mientras que las velocidades negativas indican un sentido del transporte hacia el Oeste. En el Estrecho de la Isla Gran Bahama, el flujo se ha calculado también de la misma forma que en el Estrecho de Florida, pero en este caso, las velocidades positivas indican un sentido del transporte hacia el Norte, mientras que las velocidades negativas indican un sentido del transporte hacia el Sur.

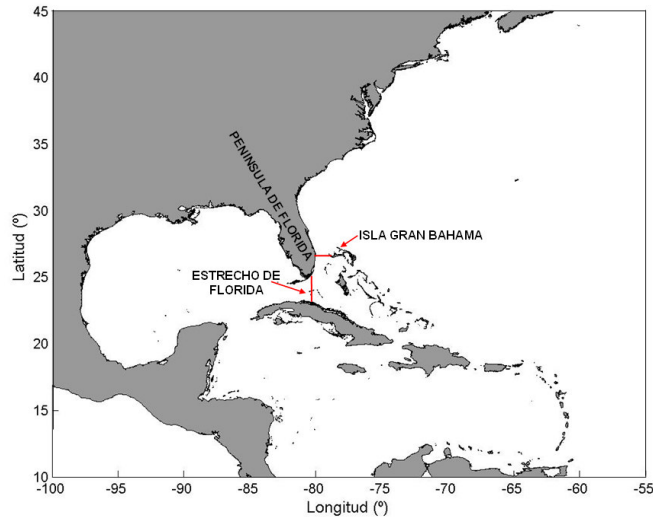


Figura 4.22. Localización de las secciones del Estrecho de Florida y de la Isla Gran Bahama para calcular el transporte en el Golfo de México.

En la figura 4.23, se muestra la resta entre el flujo medio (10 años) hacia el Este menos el flujo medio (10 años), hacia el Oeste en el Estrecho de Florida. En ella se puede observar cómo los valores netos son siempre positivos, lo que indica que durante todos los meses del año el flujo medio se dirige hacia el Este. El valor medio de la resta es de 23.5 Sv (línea roja). Este valor se corresponde con lo observado por otros autores como Böning et al. (1991), 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 para la Corriente de Florida.

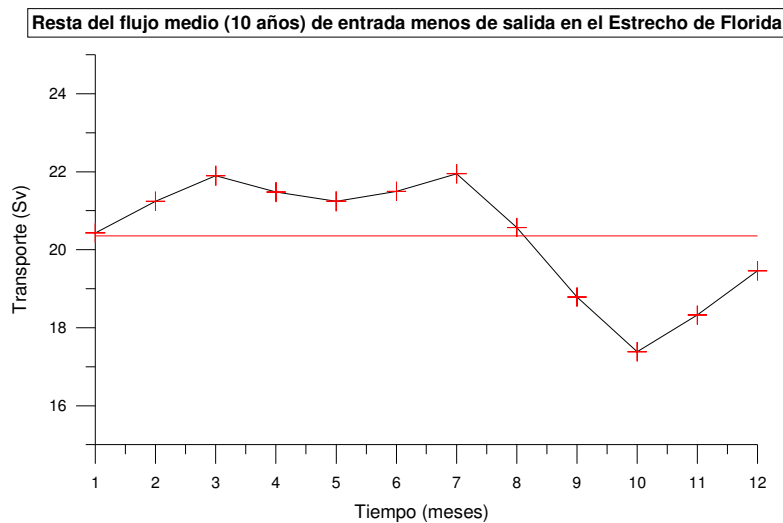


Figura 4.23. Resta del flujo medio (10 años) hacia el Este (Sv), menos el flujo medio (10 años) hacia el Oeste (Sv), en el Estrecho de Florida.

De la misma forma, en la figura 4.24 se muestra la resta entre el flujo medio (10 años) hacia el Norte menos el flujo medio (10 años) hacia el Sur en el Estrecho de que separa la Península de Florida de la Isla Gran Bahama.

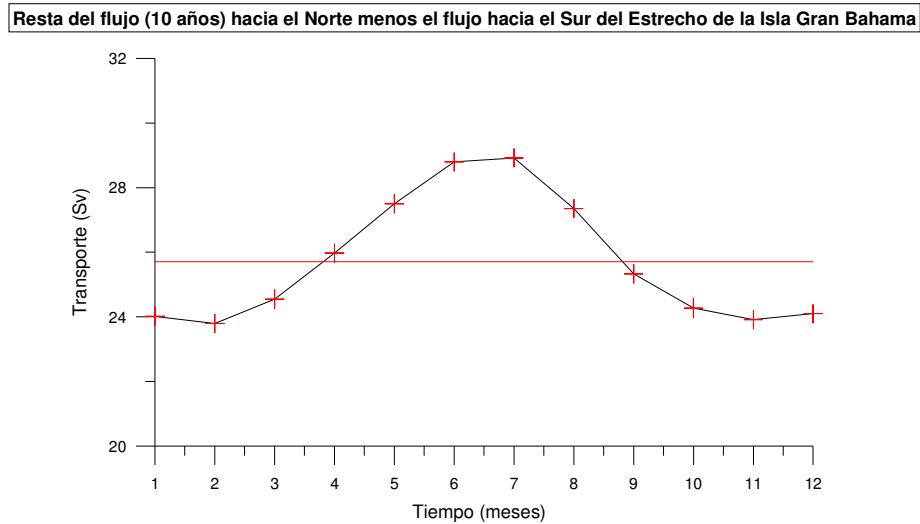


Figura 4.24. Resta del flujo medio (10 años) hacia el Norte (Sv), menos el flujo medio (10 años) hacia el Sur (Sv), en el Estrecho que separa la Península de Florida de la Isla Gran Bahama.

En la figura 4.24, se puede observar cómo los valores netos son siempre positivos, lo que indica que durante todos los meses del año el flujo neto medio se dirige hacia el Norte. El valor medio de la resta es de 25.70 (línea roja). Este valor se encuentra dentro de los rangos observados por Leaman et al. (1989), Kanzow et al. (2007) y Cunningham et al. (2007), que muestran transportes que se corresponde con lo observado por otros autores como Böning et. al., (1991), con valores que van desde 25 Sv hasta 33 Sv.

4.3 Comparación de medidas de corrientes superficiales (velocidades superficiales obtenidas a través de boyas de deriva), con resultados numéricos obtenidos tras la simulación.

4.3.1. Introducción

La complejidad de las corrientes marinas hace importante distinguir, para interpretar correctamente las observaciones, las trayectorias reales de un fluido. Estas, son las líneas de corriente lagrangianas y para su estudio se utilizan boyas de deriva, que viajando con la corriente y provistas de un transmisor de radio cuya señal puede recogerse mediante un satélite, van indicando su posición a lo largo del tiempo.

Durante siglos se intuyó la circulación superficial de los océanos a través de la deriva de objetos flotantes, pero estas observaciones solamente proporcionaban una idea muy simple de las corrientes (ya que no muestran de dónde vienen, ni tampoco su trayectoria).

Fue a principios de los años 70 cuando se desarrollaron las técnicas de posicionamiento vía satélite de objetos de deriva a través de observaciones terrestres. De esta forma se produjo un salto cuantitativo y cualitativo en el estudio de las corrientes y sus trayectorias ya que a partir de ese momento, diversos grupos y organismos comenzaron a estudiar distintas partes del océano creando mapas de corrientes a partir de boyas de deriva (Lumpkin y Pazos, 2006).

El movimiento y trayectoria de una boya lagrangiana o de deriva proporciona una aproximación a las trayectorias reales de las parcelas de fluido, ya que están diseñadas para ofrecer la menor resistencia posible. Por ese motivo se consideran una excelente herramienta para obtener series temporales de variables oceánicas con las que poder comparar, calibrar o validar los resultados obtenidos mediante modelos numéricos.

En el año 1982, dentro del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (*WCRP*), se propusieron una serie de estandarizaciones para mantener en la medida de lo posible las mismas condiciones en todos los experimentos de deriva, ya que las series globales de datos recogidas hasta la fecha presentaban diferentes características dependiendo de la boya utilizada.

El desarrollo de dichas estandarizaciones se llevó a cabo dentro del Programa de Velocidad Superficial (*SVP*) y de los experimentos denominados *TOGA* (Tropical Ocean Global Atmosphere) y *WOCE* (World Ocean Circulation Experiment), que fueron financiados por la *NOAA* y diseñados por el Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory (*AOML*), el MIT's Draper Laboratory y Scripps Institution of Oceanography (*SIO*) (Niiler, 2003).

A lo largo de los años 80 se probó y experimentó rigurosamente todos los diseños propuestos y se llegó a una serie definitiva de estandarizaciones utilizadas actualmente en todos los experimentos de deriva (Niiler et al., 1987, 1995).

Hoy día la serie de boyas de deriva de *SVP* se conoce como Programa de Deriva Global (*GDP*). Dicho programa forma parte de la *NOAA*, a través del Sistema de Observación Oceánico Global (*GOOS*), del Sistema de Observación Climático Global (*GCOS*) y de un proyecto científico denominado Panel de Cooperación de datos de boyas (*DBCP*), perteneciente a la Organización Meteorológica Mundial y a la Comisión Oceanográfica Internacional.

Los objetivos del *GDP* son proporcionar en un tiempo real y operacional observaciones de velocidad superficial, temperatura superficial (SST) y nivel de presión del mar, para la predicción numérica del tiempo atmosférico, la investigación o la verificación y calibración *in situ* de las observaciones de satélites.

El Programa de Deriva Global (*GDP*) se administra mediante una estrecha colaboración de la *NOAA/AOML* (Miami, Florida), la *NOAA/SIO* Joint Institute of Marine Observations (*JIMO*) (La Jolla, California) y tres fabricantes privados de boyas de Estados Unidos (Clearwater, Pacific Gyre y Technocean).

Donde, *AOML* organiza y lleva a cabo el lanzamiento de boyas, procesa los datos, mantiene los archivos donde se describe cada boya y el sitio web del GDP (www.aoml.noaa.gov/phod/dac/gdp.html). *JIMO* supervisa la industria, adquiere las boyas de los diferentes fabricantes, actualiza la tecnología, desarrolla nuevos sensores y crea series de datos renovadas para la comunidad científica (Pazan y Niiler, 2004). Y los fabricantes construyen las boyas de deriva según las especificaciones dadas y estiman que éstas tienen un tiempo de vida de deriva de unos 400 días aproximadamente.

Esta base de datos ha sido ampliamente utilizada en diversos estudios de investigación. Algunos de los ejemplos más recientes son los trabajos realizados por Lumpkin y Pazos (2006), Flatau et al. (2003), en el Atlántico Norte, Cuny et al. (2002), en el Mar del Labrador, Centurioni y Niiler (2003) y Richardson (2005) en el Mar Caribe. Estos trabajos, realizados a partir de los datos proporcionados por la base de datos *Global Drifter Program*, avalan la calidad de los mismos y los hacen adecuados para la validación de los resultados obtenidos en ésta Tesis.

4.3.2. Base de datos *Global Drifter Program*

Existen varios diseños de boyas de deriva: modelos que permiten moverse en la superficie del océano o bien ser arrastradas por corrientes más profundas. La base de datos *GDP* que se utiliza en la validación de los resultados obtenidos en esta Tesis, utiliza boyas que son arrastradas por corrientes más profundas.

A continuación, en la figura 4.25, se muestra un ejemplo esquemático de la boya de deriva utilizada por el *GDP* y todos sus componentes a escala, además de una imagen de la parte superior de una boya flotando en el océano.

Los flotadores provistos de un transmisor se siguen mediante el sistema ARGOS, que está especializado en sistemas de posicionamiento geográfico y transmisión de datos. Prácticamente tiene cobertura planetaria ya que el intercambio de información se hace a través de grupos de satélites especializados en dar cobertura global.

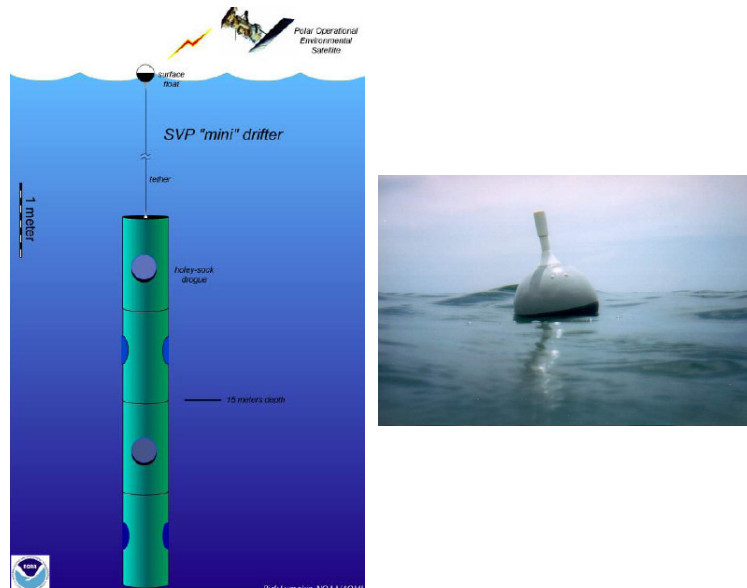


Figura 4.25. Ejemplo esquemático de un tipo de boya de deriva utilizada *GDP* con todas sus componentes a escala (figura de la izquierda) y ejemplo de la parte superior de una boya flotando en el océano (figura de la derecha) (Fuente: <http://www.aoml.noaa.gov/phod/dac/gdp.html>)

El posicionamiento de una boya (o PTT en la jerga ARGOS) seguida mediante el sistema ARGOS, es administrado por la corporación internacional *Collecte localisation Satellites* (CLS), con sede en Toulouse (Francia). Cada emisor tiene un identificador único que debe darse de alta en el organismo correspondiente (CLS en Europa). Los emisores (PTT) emiten constantemente una señal por radiofrecuencia que es recibida por los satélites cuando estos pasan cerca de su posición.

La señal se emite con una periodicidad de 90 segundos y una autonomía aproximada de 400 días.

Una vez emitida la señal en radiofrecuencia es recibida por el sistema de adquisición de datos (DCS, Data Collection System) a bordo de los satélites NOAA, que guardan la información y la transmiten a cualquiera de las estaciones receptoras terrestres que el sistema ARGOS tiene repartidas por todo el globo (Figura 4.26).

Posteriormente, una vez descargados los datos en alguna estación de recepción, éstos se envían automáticamente a los centros de procesado (Francia y Estados Unidos), donde son utilizados para recalcular las posiciones de los PTT detectadas por uno o varios satélites.

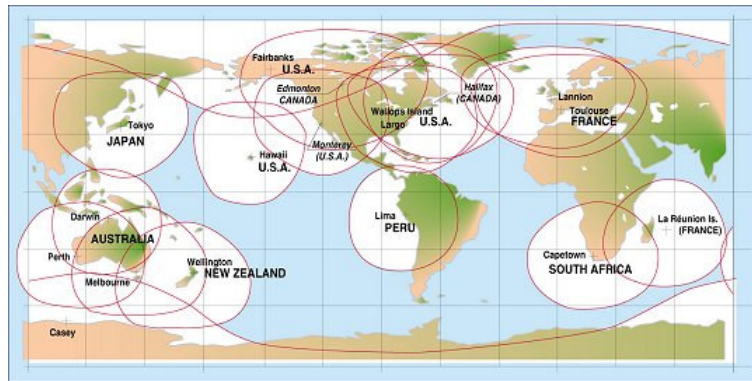


Figura 4.26. Distribución de las estaciones receptoras del sistema ARGOS (Fuente: CLS-ARGOS).

Los datos brutos se interpolan en intervalos de 6 h utilizando un procedimiento óptimo de interpolación denominado Kriging (Hansen y Herman, 1989; Hansen y Poulain, 1996). El método Kriging asume que las observaciones son el resultado de una señal contaminada por ruido. Los valores interpolados se construyen a partir de una combinación de las 5 señales anteriores más las 5 señales siguientes, dando diferentes “pesos” a cada valor. Este conjunto de pesos se ha construido de tal forma que el objetivo es minimizar la raíz media cuadrática entre el valor real y el valor interpolado.

Los valores resultantes se consideran combinación entre el arrastre del viento en superficie (el viento arrastra los flotadores) y el arrastre de las corrientes a 15 m de profundidad (el punto medio del lastre de la boya se sitúa a 15m de profundidad (ver figura 4.25)), y tal y como se muestra en la figura 4.27, las observaciones cubren prácticamente todas las áreas del océano.

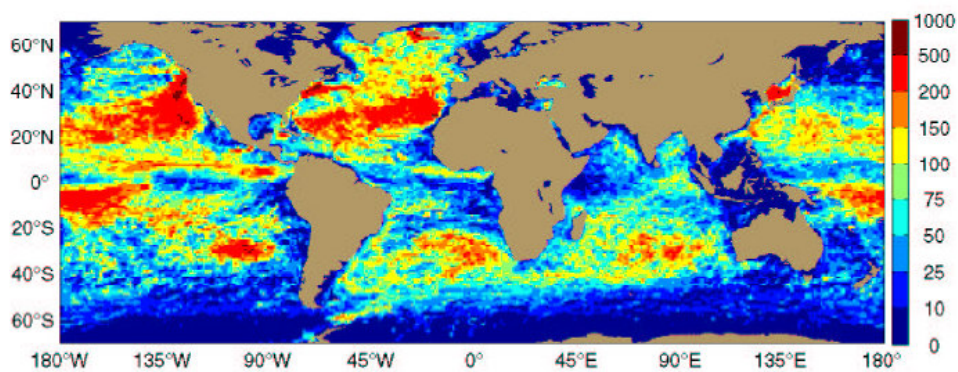


Figura 4.27. Densidad de observaciones (días de deriva por grado al cuadrado).

Como resultado final, se dispone de una base de datos de climatologías mensuales de velocidad, además de otros parámetros como la temperatura o la salinidad superficial. Dicha climatología se ha realizado a partir de los datos suministrados por boyas a la deriva (boyas arrastradas por corrientes a 15 m de profundidad), durante el periodo 1998-2003. Presenta una resolución espacial de 1° tanto en longitud como en latitud, así como una resolución temporal de 1 mes.

4.3.3. Validación

Los datos proporcionados por la base de datos de climatologías mensuales de velocidad, *Global Drifter Program*, se ha utilizado para validar los resultados obtenidos tras la simulación del modelo MEDiNA. Más en concreto, se han comparado las medidas de corrientes (velocidades obtenidas a través de boyas de deriva), con las medidas de corrientes del modelo MEDiNA (velocidades obtenidas como resultado de una simulación numérica).

El lugar que se ha escogido para realizar la validación dentro del dominio del modelo MEDiNA, ha sido la zona del Golfo de México (malla GOM), y el motivo se debe a tres razones principales. La primera de ellas es que dicha zona contiene una de las estructuras más energéticas y difíciles de estabilizar de todo el sistema, la Corriente del Golfo, ya que tarda aproximadamente 11 años de ejecución en alcanzar su equilibrio dinámico (tal y como se ha descrito al principio de este capítulo). Además, puesto que todas las mallas se encuentran interconectadas entre si, todas se ven afectadas por la energía que esta malla contiene, malla GOM, por lo tanto la estabilización del resto del dominio depende de la estabilización de dicha malla. Y por último, la base de datos *GDP* presenta una gran densidad de observaciones en dicha zona (ver figura 4.27), por lo que se tiene una gran cantidad de datos para validar y esto hace que la validación sea más robusta y consistente.

A continuación, en la figura 4.28 se muestra los valores del módulo de la velocidad media (m/s), proporcionados por la base de datos *GDP* (resolución espacial de 1° tanto en longitud como en latitud), para todos los meses del año.

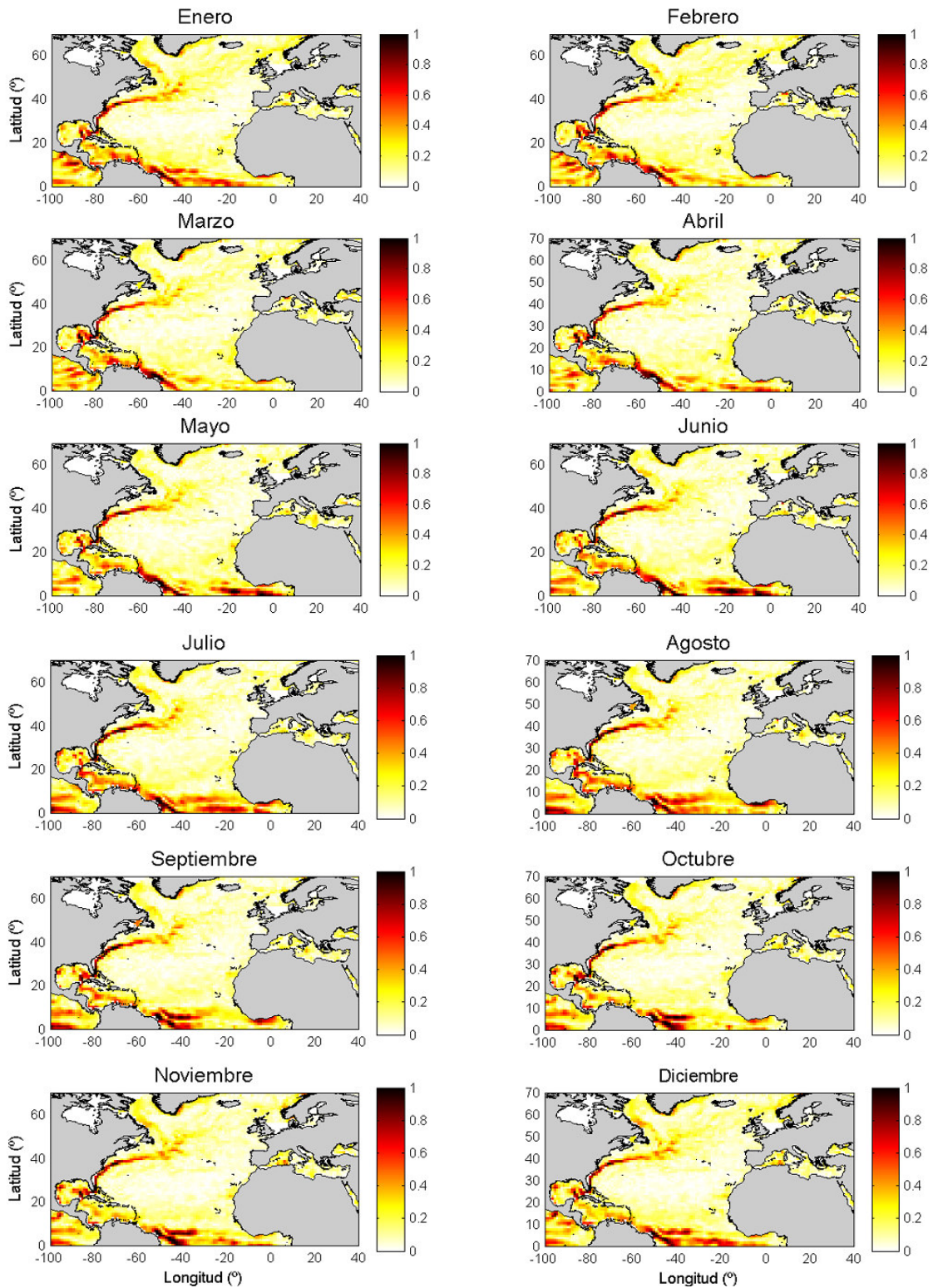


Figura 4.28. Modulo de las velocidades superficiales (m/s), de la base de datos *GDP*, para todos los meses del año.

Si se observa la figura 4.28, se puede ver que la cuenca occidental del Océano Atlántico Norte es mucho más energética que la cuenca oriental, y en ella se pueden distinguir estructuras claramente definidas como la corriente objeto de esta validación,

la Corriente del Golfo, cuya señal se ve con claridad a lo largo de todos los meses del año. Su trayectoria no varía de manera significativa, pero no ocurre lo mismo con su velocidad. Las velocidades medias máximas se alcanzan en los meses de julio, junio y febrero (0.2226 m/s, 0.21571 m/s y 0.2187 m/s, respectivamente), mientras que durante los meses de octubre, noviembre y septiembre se alcanzan las velocidades medias mínimas (0.1933 m/s, 0.1960 m/s y 0.1988 m/s respectivamente). Se utilizará por tanto la trayectoria y velocidad de la Corriente del Golfo dada por la base de datos GDP, para validar los resultados obtenidos por el modelo MEDiNA.

Las corrientes de la base de datos *GDP*, son el resultado de la combinación del arrastre del viento en superficie y el arrastre de las corrientes a 15 m de profundidad. Por esa razón se utilizará para validar los resultados, las corrientes del modelo MEDiNA en la capa que más se aproxima a dicha profundidad (2ª capa).

En la figura 4.29, se muestra el módulo de la velocidad media (m/s), de la 2ª capa, obtenido para todos los meses del año (resultados numéricos obtenidos tras la simulación del modelo MEDiNA).

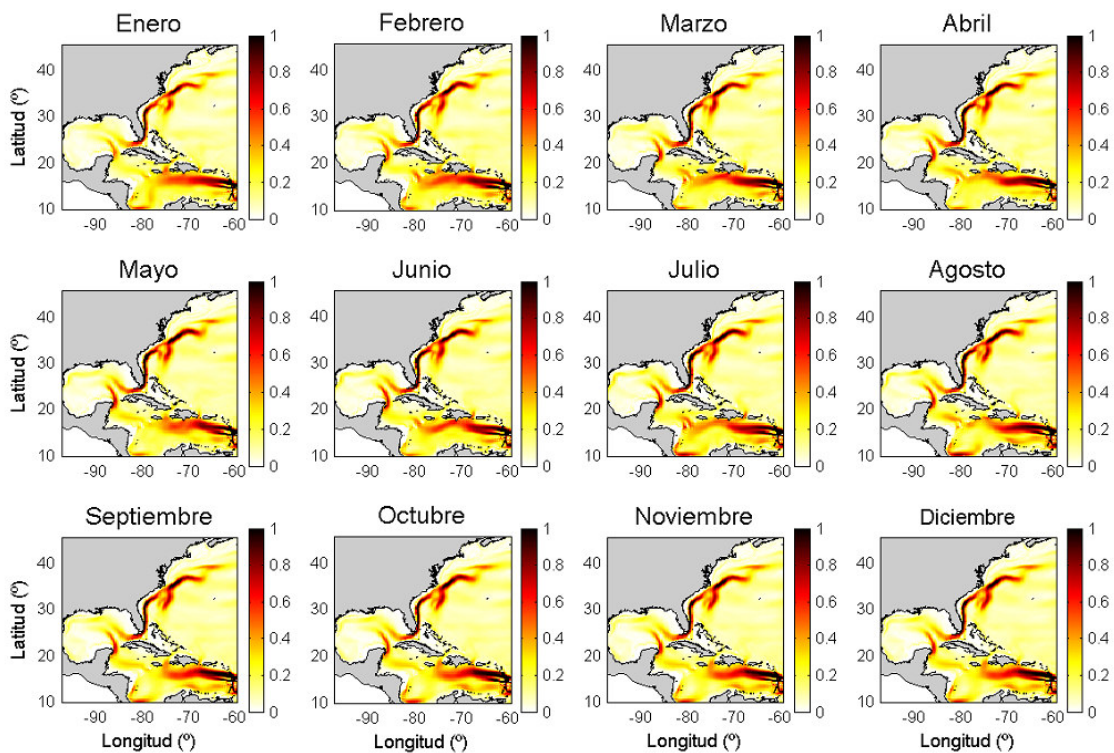


Figura 4.29. Media (10 años) del módulo de las velocidades superficiales (m/s), para todos los meses del año, obtenidas a partir de los resultados del modelo MEDiNA.

Puesto que la malla GOM presenta una resolución horizontal de $1/4^\circ$ de grado y la base de datos GDP presenta una resolución de 1° para todo el dominio, se ha disminuido la resolución de la malla GOM, para que los datos sean intercomparables. En la figura 4.30, se muestra la media (10 años) del módulo de la velocidad media (m/s), obtenida para todos los meses del año (resultados numéricos obtenidos tras la simulación del modelo MEDiNA), con una resolución de 1° tanto en longitud como en latitud. Las velocidades medias máximas se alcanzan entre julio, junio y enero (0.1943768 m/s, 0.194335 m/s y 0.1886 m/s, respectivamente) y las velocidades medias mínimas entre octubre, agosto y septiembre (0.1761 m/s, 0.18021 m/s y 0.1826 m/s, respectivamente).

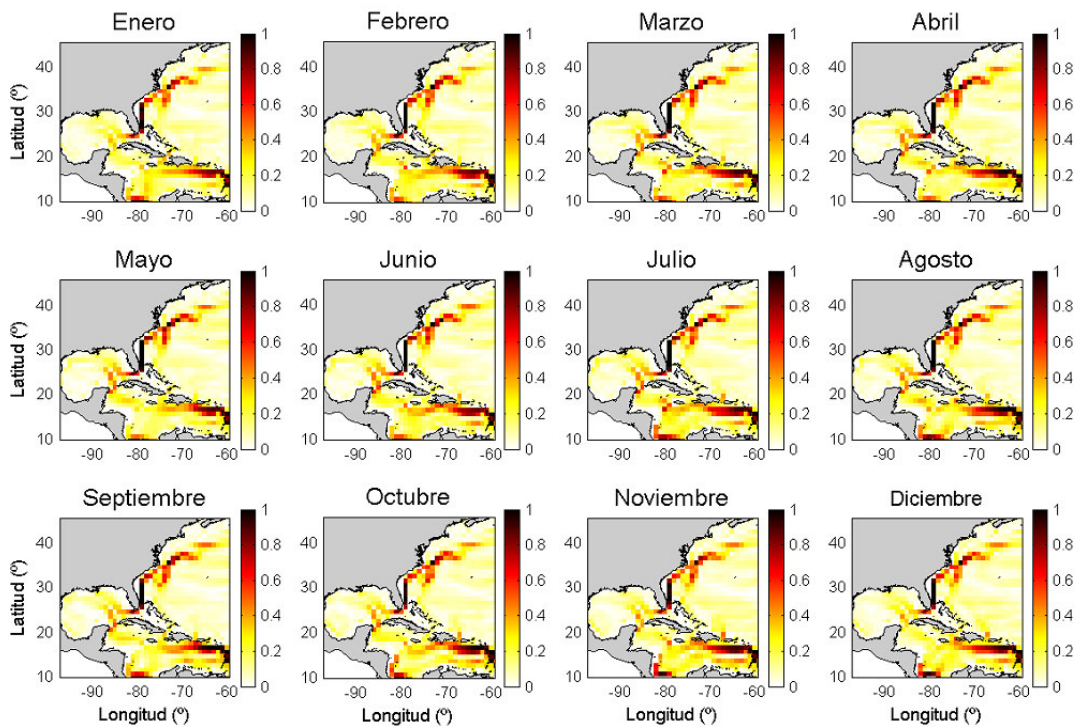


Figura 4.30. Media (10 años) del módulo de las velocidades superficiales, para todos los meses del año, obtenidas a partir de los resultados del modelo MEDiNA, e interpoladas a una malla de 1° de resolución.

Se puede decir por tanto que los resultados de las velocidades medias tanto máximas como mínimas dadas por el modelo MEDiNA, se presentan en los mismos meses que los valores medios dados por la base de datos GDP (velocidad media máxima en el mes de julio y su velocidad media mínima en el mes de octubre). Los valores dados por el modelo MEDiNA son un 10% inferiores a los valores proporcionados por la base de datos GDP. Todo esto puede ser debido a las diferencias

que presentan los datos comparados, ya que el modelo MEDiNA utiliza vientos climatológicos (año perptuo), donde la transferencia de momento no es igual que con los vientos reales (con los que se genera la base de datos GDP), donde existen picos de intensidad. Además, las velocidades dadas por el modelo MEDiNA están promediadas en el centro de las capas, mientras que como ya se ha dicho anteriormente, las velocidades de la base de datos GDP son interpolaciones de medidas realizadas con boyas.

Por último, en la figura 4.31, se muestra (a), el módulo de la velocidad media (10 años), de los valores dados por la base de datos GDP (línea roja), y los resultados del modelo MEDiNA (línea azul) y en ella se puede ver cómo los resultados del modelo MEDiNA subestiman los resultados mostrados por la base de datos GDP.

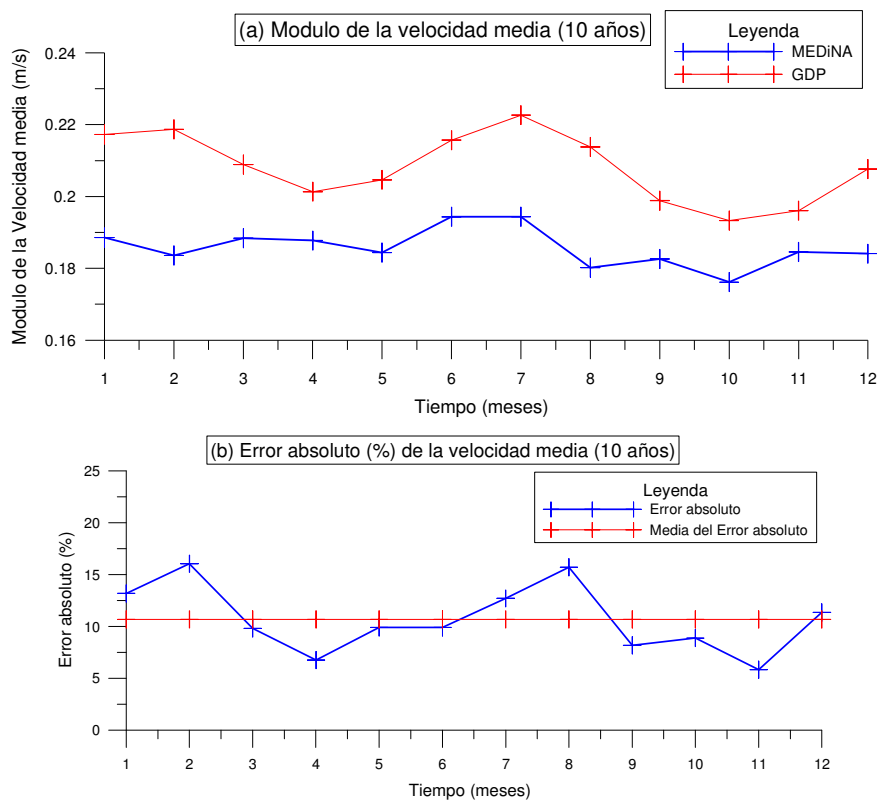


Figura 4.31. (a) Modulo de la velocidad media (10 años) de los valores dados por la base de datos GDP (línea roja) y los resultados del modelo MEDiNA (línea azul). (b) Error absoluto de la velocidad media (10 años) entre los valores dados por la base de datos GDP y los resultados del modelo MEDiNA.

En la figura 4.31 b se presenta el error absoluto medio (10 años), del módulo de la velocidad entre los valores dados por la base de datos GDP y los resultados del modelo MEDiNA. El error absoluto mínimo se produce en el mes de noviembre y es del 5.85% mientras que el error absoluto máximo se produce en el mes de febrero y es del 16%. El error absoluto medio es del 10.69%.

En la figura 4.32, se muestra la media anual (12 meses), del módulo de la velocidad (m/s), (a), de la base de datos *GDP* y (b), de los resultados del modelo MEDiNA. Se puede apreciar cómo en ambas figuras la Corriente del Golfo muestra una trayectoria media clara y definida. La velocidad media anual máxima de la base de datos *GDP* en el dominio de la malla GOM, es de 1.17 m/s, mientras que la velocidad media anual máxima de los resultados del modelo MEDiNA en el dominio de la malla GOM, es de 1.56 m/s. Esto supone que el modelo MEDiNA sobrestima casi un 25% la velocidad media anual máxima.

Si se observa con detenimiento la figura 4.32, se puede ver que solo en algunos puntos el modelo MEDiNA presenta valores medios anuales superiores a la base de datos GDP. En general, la base de datos GDP (figura 4.32 a), presenta valores mayores de velocidad media anual. Los puntos donde los resultados del modelo MEDiNA son mayores coinciden con la zona final del arco de islas del caribe, concretamente en las antillas menores situadas en la parte inferior derecha de la figura 4.32 b. Estos puntos de velocidad máxima dados por el modelo MEDiNA se pueden deber a la batimetría, ya que esa zona presenta una plataforma muy somera donde el modelo ha podido sobrestimar los valores medios anuales. También se puede observar como la trayectoria de la corriente en dicha zona se encuentra desplazada hacia el Norte. Esto viene a corroborar la idea de un mal ajuste de la batimetría en la zona del arco de islas del caribe que hace el modelo MEDiNA, subestime los valores dados por la base de datos GDP, así como que la trayectoria de la corriente se encuentre desplazada hacia el Norte.

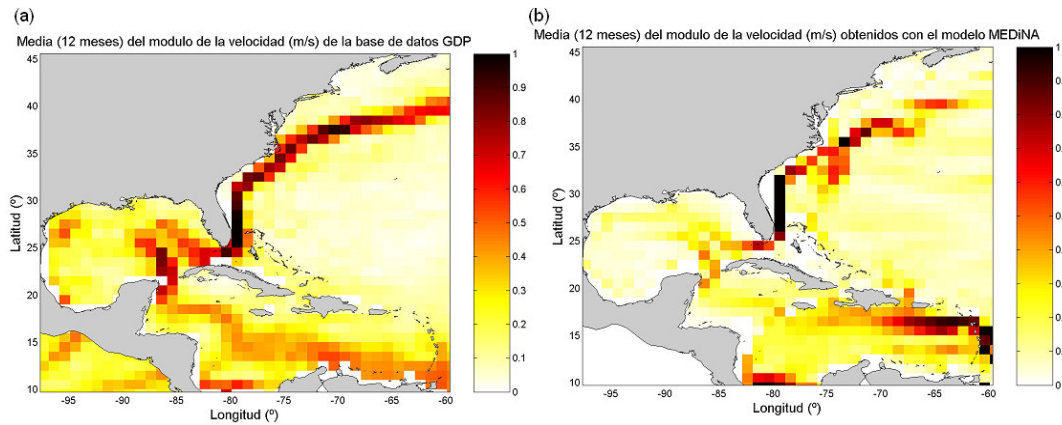


Figura 4.32. Media anual (12 meses), del módulo de la velocidad (m/s), (a), obtenida a partir de la base de datos *GDP*. (b) obtenida a partir de los resultados del modelo MEDiNA.

Para contrastar la trayectoria de la Corriente del Golfo, se han comparado los valores del módulo de la velocidad media de la base de datos *GDP* y de los resultados del modelo MEDiNA. Para ello se ha generado una matriz de ceros y unos y se ha asignado el valor 1, a todos los módulos mayores de 0.15 m/s y 0, a todos los módulos menores o iguales a 0.15 m/s. De esta forma se puede ver si el modelo MEDiNA es capaz de representar adecuadamente la trayectoria de la corriente del Golfo y cuánto se desvía ésta de la posición dada por la base de datos *GDP*. En las figuras 4.33 a, b y c, se puede observar la comparación realizada entre la matriz de ceros y unos obtenida a partir de la base de datos *GDP* (primera fila de datos), de los resultados numéricos del modelo MEDiNA (segunda fila de datos), y la resta entre ambas matrices (tercera fila de datos), para todos los meses del año, (a), para enero, febrero, marzo y abril, (b), para mayo, junio, julio y agosto y (c), para septiembre, octubre, noviembre y diciembre.

En la figura 4.33, se puede observar la trayectoria de Corriente del Golfo dada por el modelo MEDiNA se ajusta bastante bien a la trayectoria dada por la base de datos *GDP* a lo largo de los meses del año, aunque tal y como se puede apreciar en las gráficas de la resta (tercera fila de gráficas), el modelo MEDiNA sobrestima la posición de la trayectoria en el zona Norte de la Corriente del Golfo (color azul) y la subestima en la zona Sur de la Corriente del Golfo (color rojo), con respecto a los valores dados por la base de datos *GDP*.

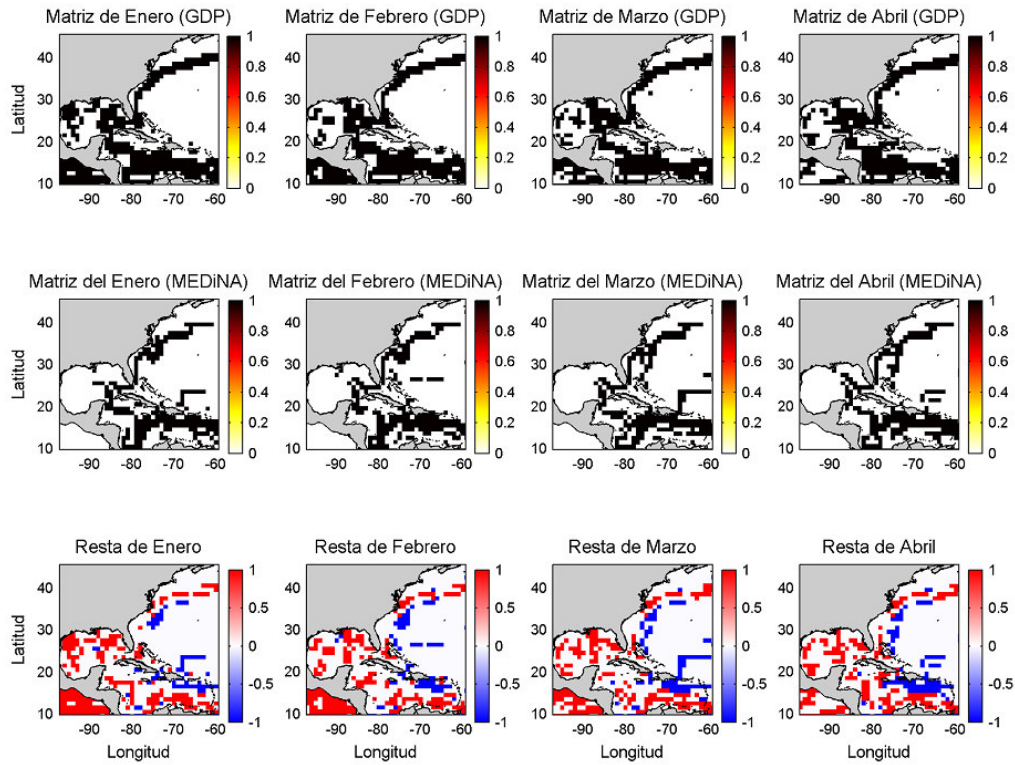


Figura 4.33 a. Matriz de ceros y unos de la base de la base de datos *GDP*, de los resultados numéricos del modelo MEDiNA y resta entre ambas matrices (enero, febrero, marzo y abril).

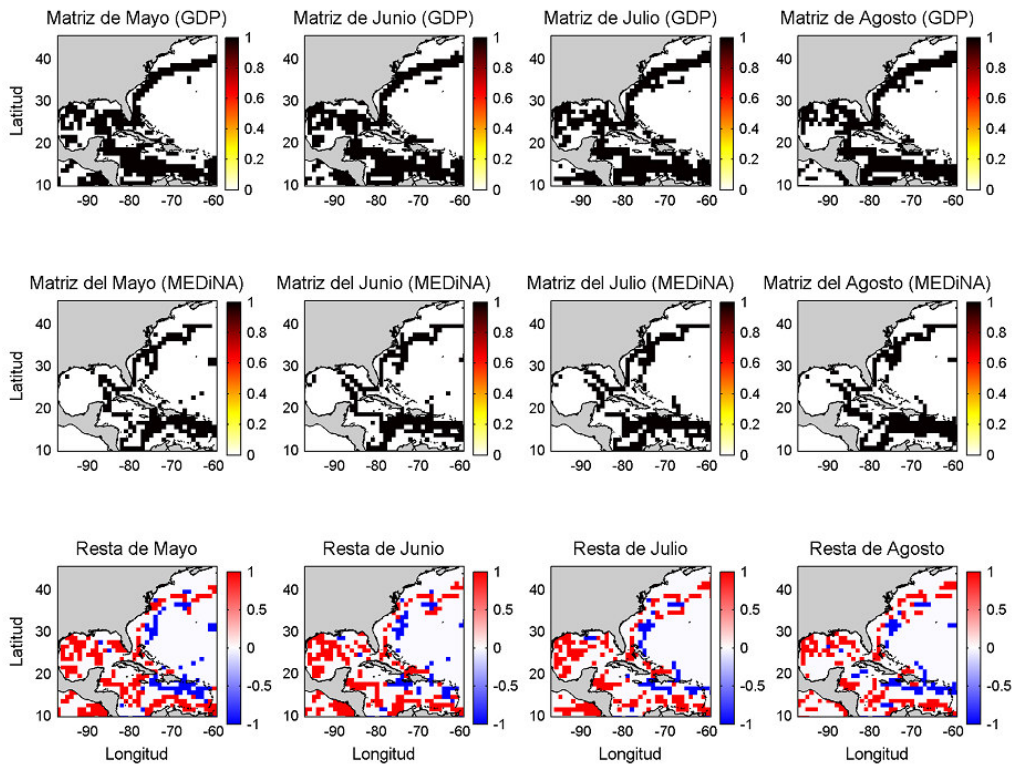


Figura 4.33 b. Matriz de ceros y unos de la base de la base de datos *GDP*, de los resultados numéricos del modelo MEDiNA y resta entre ambas matrices (mayo, junio, julio y agosto).

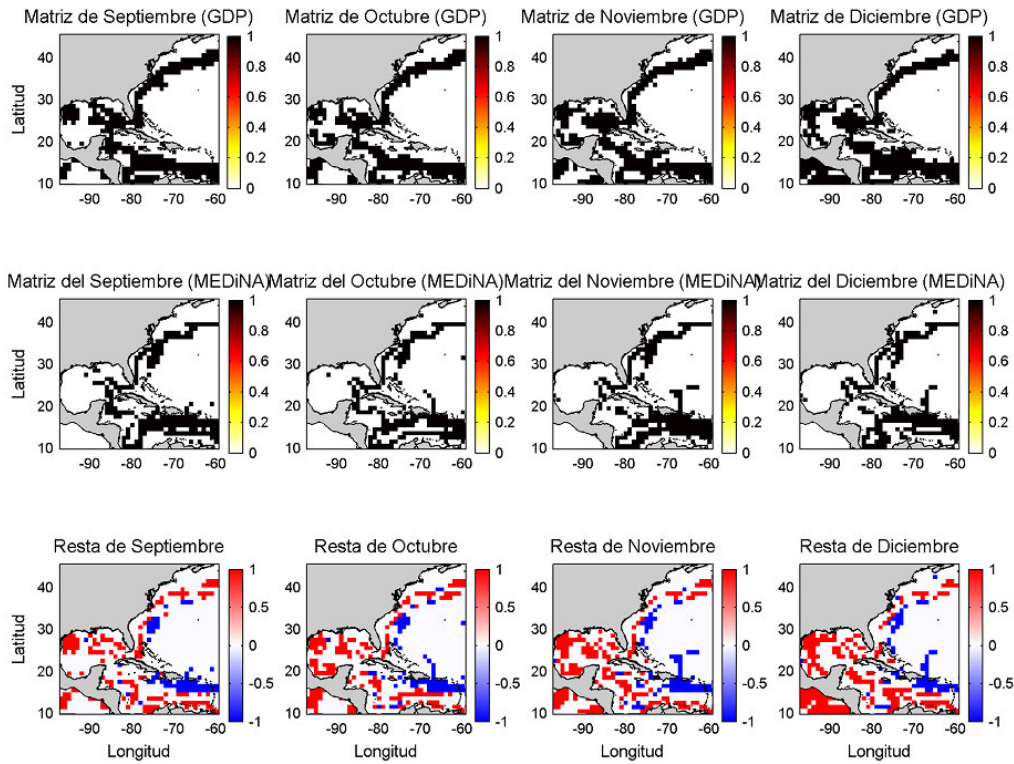


Figura 4.33 c. Matriz de ceros y unos de la base de la base de datos *GDP*, de los resultados numéricos del modelo MEDiNA y resta entre ambas matrices (septiembre, octubre, noviembre y diciembre).

4.4 Resumen y Conclusiones

El modelo MEDiNA se ha ejecutado a lo largo de 46 años (se ha forzado con un año climatológico o año perpetuo) y se han generado 46 años de series temporales de salinidad, temperatura y de las componentes u , v y w de la velocidad.

Para analizar y validar los resultados derivados de la simulación 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 más 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 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 dos 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.

En primer lugar, para validar los resultados del modelo se ha calculado el transporte en las 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),

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), García-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.

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 neto obtenido por el modelo MEDiNA es de 0.34 ± 0.5 Sv, el transporte hacia el Norte de 0.9 Sv y hacia el Sur de 0.5 Sv. Estos resultados se aproximan a lo obtenido por Pinot et al. (2002), que observaron un transporte hacia el Norte de 0.7 Sv y hacia el Sur de 0.2 Sv.

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.

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 entre 24 Sv y 23 Sv.

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. (1991), 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)).

Se resume a continuación en una tabla (tabla 4.2), 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 hacia el Sur 0,2	Pinot et al. (2002)
Estrecho de Sicilia	1,4	1,1	Astraldi et al. (1999)
		1,01	Beranger 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 4.2. Comparación de los valores dados por el modelo MEDiNA y los valores mostrados por la bibliografía.

Además, se ha 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 media obtenidos con el modelo MEDiNA, son aproximadamente el 10.69% inferiores a los dados por la base de datos GDP. Es decir, el modelo MEDiNA subestima los valores dados por la base GDP un 10.69%, aunque los valores de velocidad media máximos y mínimos se presentan en los mismos meses, julio y octubre respectivamente. El error absoluto mínimo se produce en el mes de noviembre y es del 5.85% mientras que el error absoluto máximo se produce en el mes de febrero y es del 16%. El error absoluto medio es del 10.69%.

Aunque el ajuste entre los datos del modelo MEDiNA y los datos GDP no es perfecto pero 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 interpolaciones de medidas realizadas con boyas.

En cuanto a la comparación de los valores de velocidad media anual, se ha podido observar que el modelo MEDiNA presenta puntualmente valores medios anuales superiores (hasta un 25%) a la base de datos GDP, aunque en general la base de datos GDP presenta valores mayores de velocidad media anual. Estos valores puntuales de velocidad máxima dados por el modelo MEDiNA, se pueden asociar a un mal ajuste de la batimetría en la parte inferior derecha de la malla que comprende el Golfo de México, en la zona del arco de islas del caribe (antillas menores), y puede ser la causa a su vez, de que la trayectoria de la corriente en dicha zona se encuentre desplazada hacia el Norte. Todo ello se deberá estudiar con más detalle para poder conocer con exactitud las causas de que el modelo MEDiNA presente valores puntuales medios anuales hasta un 25% superiores a la base de datos GDP.

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 (las zonas situadas al Norte de la trayectoria de la corriente del Golfo) y otras zonas (las situadas al Sur), donde subestima los valores dados por la base de datos de climatologías (*GDP*).

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 buena calidad.

