

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 VI:

Patrones de circulación oceánica en el litoral español

A lo largo de los capítulos 4 y 5 de esta Tesis, se han validado, analizado y descrito algunos de los principales resultados obtenidos tras las simulaciones realizadas con el modelo MEDiNA.

Como objetivo general en este capítulo, se plantea la aplicación de herramientas estadísticas para la exploración de los resultados logrados, con el fin de obtener patrones de circulación en el litoral español.

Para llevar a cabo este objetivo general, se plantean una serie de objetivos parciales desarrollados en cada uno de los apartados de este capítulo, de forma que el primer apartado se dedica a la introducción y en él se presentan las herramientas seleccionadas para llevar a cabo este estudio. En el segundo apartado, se describe la primera técnica estadística utilizada (*Empirical Orthogonal Function*, EOF), así como los resultados logrados tras su aplicación para la organización de los datos en la cuenca mediterránea.

En el tercer apartado, se describe la técnica que se utilizará para organizar automáticamente los datos obtenidos en el apartado anterior (*Self Organizing Maps*, SOM) y se muestra los resultados conseguidos. En el cuarto apartado, se analiza la relación que los patrones atmosféricos tienen con los patrones de circulación en el Mar Mediterráneo. En el quinto apartado, se muestran los patrones de circulación en el Golfo de Vizcaya y por último, en el sexto apartado, se realiza un resumen y se exponen las conclusiones obtenidas.

6.1. Introducción

Tras las simulaciones numéricas realizadas para el desarrollo de esta Tesis, se ha obtenido una inmensa cantidad de datos (series temporales de 35 años de variables oceanográficas como la temperatura, la salinidad o las componentes u y v de la velocidad), y se ha puesto de manifiesto la necesidad de utilizar herramientas estadísticas con las que se pueda eliminar la redundancia y organizar los resultados, para que de esta forma se puedan comprender las relaciones de dependencia entre las variables que se quieren estudiar.

Una de las técnicas estadísticas que se ha seleccionado para llevar a cabo este estudio es el análisis de *Componentes Principales*, también denominado análisis de *Funciones Ortogonales Empíricas* (Empirical Orthogonal Function, EOF).

El motivo por el que se ha seleccionado esta técnica estadística estándar, ha sido por ser adecuada para eliminar la información redundante con la mínima pérdida de variabilidad. Ésta se logra proyectando el conjunto de datos en un nuevo espacio de menor dimensión que el original, donde las nuevas variables, representen aquellas direcciones del espacio donde los datos tienen mayor varianza; es decir, que es una técnica eficiente para comprimir datos (Preisendorfer and Mobley, 1988) y que ha sido utilizada en numerosas ocasiones tanto en oceanografía como en meteorología (Pinardi y Masetti, 2000; Korres, et al., 2000; Faucher et al., 2002; Oey et al., 2004; Alvera-Azcárate et al., 2005).

Una vez que se tienen los resultados simplificados, se analizan mediante otro tipo de herramientas, técnicas de aprendizaje automático, para obtener patrones que expliquen las relaciones observadas entre los datos; por ejemplo, la relación entre la circulación oceánica en el Golfo de Vizcaya y la circulación atmosférica. La técnica de clasificación seleccionada para llevar a cabo este proceso se denomina, *Redes Neuronales Auto-Organizativas* (Self Organizing Maps, SOM).

El motivo por el que se ha escogido esta técnica, es porque las redes auto-organizativas son redes neuronales competitivas, utilizadas para detectar

automáticamente grupos de patrones similares, en el conjunto de los datos disponible. Además, estas redes están especialmente indicadas para trabajar en espacios de alta dimensionalidad, ya que permiten organizar y visualizar los datos de forma intuitiva y eficiente, proyectándolos en un espacio arbitrario, así como establecer relaciones de vecindad entre patrones próximos. En los últimos años han sido numerosas las aplicaciones que han utilizado las ventajas de esta técnica (Oja y Kaski, 1999 y referencias incluidas). En meteorología y oceanografía existen ya algunos estudios que se han valido de dicha técnica para el análisis de los datos (Hewitson and Crane 2002; Hsu et al., 2002; Hong et al., 2005, Gutiérrez et al., 2005; Ultsch y Röske, 2002;, Richardson et al., 2003; Risien et al., 2004; Lui et al., 2005; Reusch et al., 2007; Lee et al., 2008).

A continuación, en los siguientes apartados, se describen y se muestran los resultados obtenidos tras la aplicación de los métodos seleccionados.

6.2. Funciones ortogonales Empíricas (EOF)

La técnica EOF, es un método estadístico que descompone una determinada variable numérica espacio-temporal en una combinación lineal de modos o funciones ortogonales numéricas (Preisendorfer and Mobley, 1988). Con solo unos pocos modos, se puede explicar la mayor parte de la variación (espacial y temporal) de una variable, considerando que el resto no es significativo para su variación espacio-temporal de la variable.

Como ya se ha comentado anteriormente, con esta técnica se consigue eliminar la información redundante con la mínima pérdida de variabilidad y es especialmente útil en espacios de alta dimensionalidad, donde los datos pueden estar correlacionados en sus distintas componentes y por tanto, pueden contener mucha información redundante en su descripción.

La descomposición en EOF se puede realizar analizando la variabilidad desde dos puntos de vista: mediante una descomposición espacial de la variabilidad, donde se manifiestan los gradientes espaciales, y mediante una descomposición temporal de la variabilidad, donde se revelan las variaciones temporales (Baldacci et al, 2001).

Si se considera una variable genérica $Z(x, \tau)$, x será el vector que contiene las posiciones donde se encuentra definida la variable y τ será el vector que contiene los tiempos donde se encuentra definida la variable. De este modo $x = \{x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_m\}$, y $\tau = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_j, \dots, \tau_m\}$.

Por lo tanto, si se quiere reconstruir la variable $Z(x, \tau)$ a partir de la descomposición temporal con un número reducido de modos, se debe sumar la media temporal de la variable más el producto de la variación espacial por la variación temporal de cada modo, tal y como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Z(\mathbf{x}, \tau) = Z_{media}(\mathbf{x}) + f_1(\mathbf{x})g_1(\tau) + f_2(\mathbf{x})g_2(\tau) + \dots + f_p(\mathbf{x})g_p(\tau) \quad (6.1)$$

El número de modos (p) que se escogen para reconstruir la variable, dependerá del porcentaje de la varianza de la muestra que se desee explicar. A continuación se muestran y analizan los resultados obtenidos tras la aplicación de los EOF, a los resultados obtenidos tras la ejecución del modelo MEDiNA.

6.2.1. Aplicación de EOF para la organización estadística de los resultados.

Puesto que el Mar Mediterráneo es posiblemente dentro del dominio de estudio, la zona de cuya circulación oceánica es más conocida, se ha optado por analizar en primer lugar los resultados obtenidos en dicha zona, para que de esta manera se puedan contrastar los resultados dados por el modelo con los datos proporcionados por la bibliografía. Las variables que se van a estudiar en primer lugar son las componentes u y v de la velocidad.

Componentes u y v de la velocidad en la cuenca mediterránea.

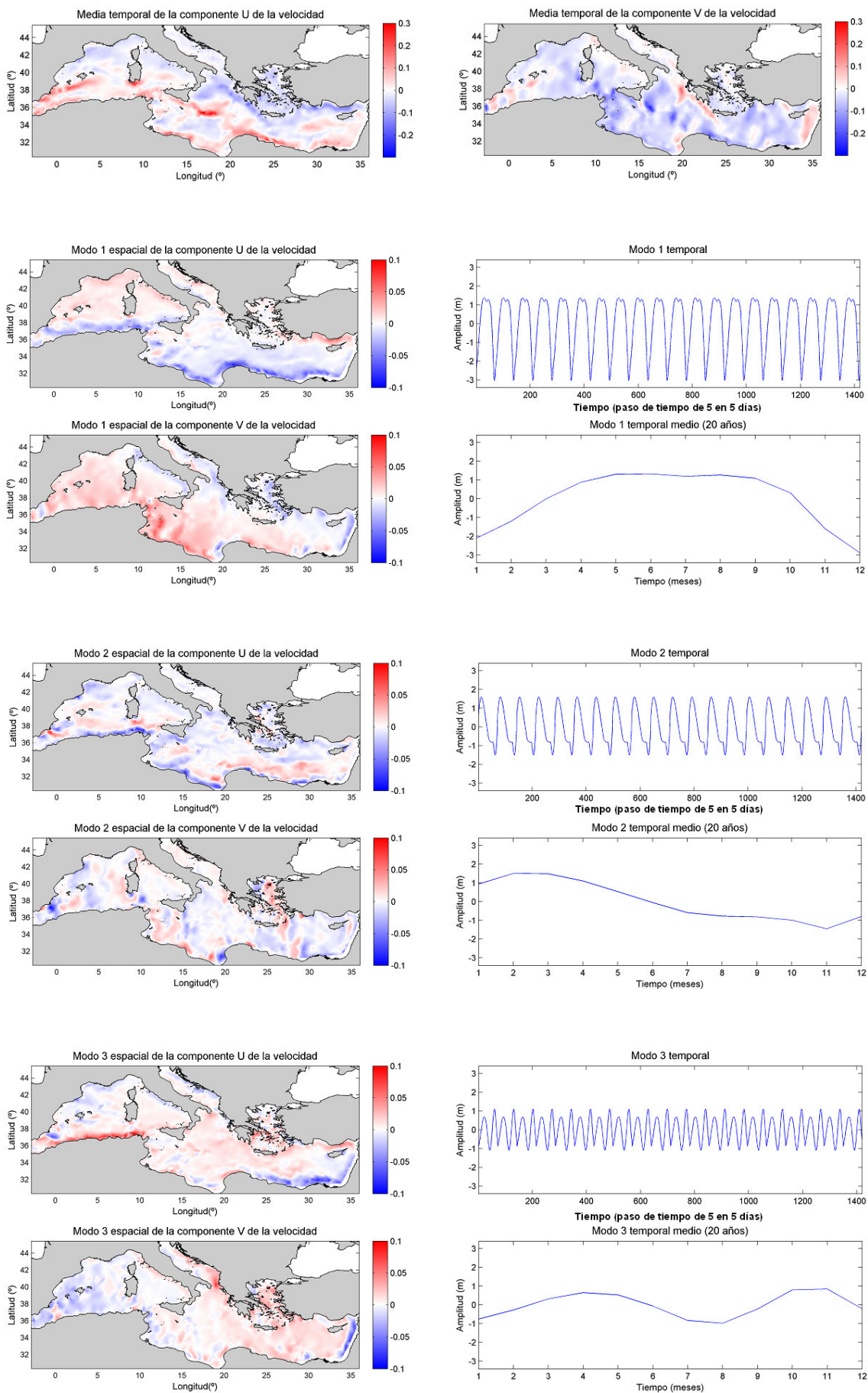
Tal y como se ha descrito en el capítulo dedicado a la introducción de esta Tesis, la circulación en el Mediterráneo es compleja y está compuesta por diferentes escalas temporales que interactúan entre si. Por ese motivo se ha aplicado en primer lugar, la técnica EOF a las series temporales de 20 años (medias cada 5 días), de las componentes u y v de la velocidad de la corriente superficial. Para ello, se han calculado el número de modos que explican el 99% de la varianza de las componentes u y v de la velocidad de la corriente superficial.

Tal y como se muestra en la tabla 6.1, se han obtenido 23 modos de los cuales, sólo los seis primeros explican ya más del 90% de la varianza.

MODOS	VARIANZA (%)	SUMA VARIANZA (%)
modo1	48,22383	92,4040152
modo2	23,381616	
modo3	9,2646067	
modo4	6,1627809	
modo5	2,9598417	
modo6	2,4113399	
modo7	1,1738632	
modo8	1,0089918	
modo9	0,67491893	
modo10	0,55639125	
modo11	0,48861768	
modo12	0,44343817	
modo13	0,38280163	
modo14	0,32591878	
modo15	0,28777266	
modo16	0,27099858	
modo17	0,20744924	
modo18	0,20283414	
modo19	0,16848679	
modo20	0,14811876	
modo21	0,12437472	
modo22	0,11451327	
modo23	0,10207102	

Tabla 6.1. Tabla de modos que explica el 99 % de la varianza de las componentes u y v de la velocidad de la corriente superficial, en el Mar Mediterráneo.

A continuación se muestra la media temporal de la componente u y v (m/s), así como los seis primeros modos espaciales, temporales y temporales medios (20 años), obtenidos tras la aplicación de la técnica EOF a las componentes u y v de la velocidad de la corriente superficial (Figura 6.1). Aunque la representación de los modos no tiene por qué tener ningún sentido físico, a continuación se muestran los modos que matemáticamente representan un porcentaje mayor del 90% de la varianza de los datos.



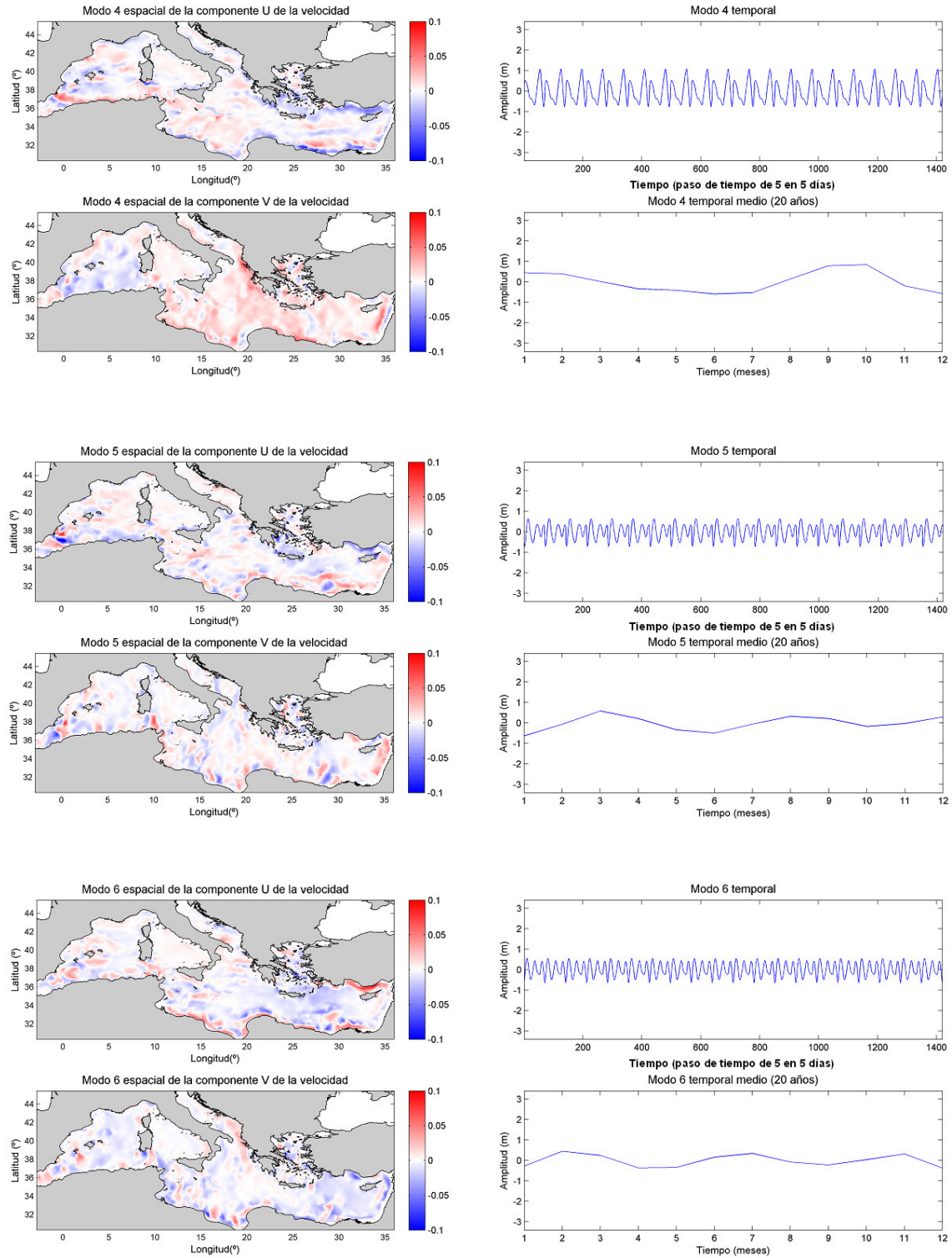


Figura 6.1. Media temporal (m/s) y modo 1, 2, 3, 4, 5 y 6 espacial, temporal y temporal medio (20 años), del las componentes u y v de la velocidad de la corriente superficial, en la cuenca mediterránea.

Las gráficas de la media temporal muestran la circulación media en el Mediterráneo para las componentes u y v de la velocidad superficial y las gráficas de los modos, se muestra en líneas generales como se reproduce una corriente ciclónica que

presenta diferentes intensidades a lo largo de las costas del Sur del mediterráneo y una corriente anticiclónica que también presenta diferentes intensidades a lo largo de las costas del Norte del Mediterráneo.

El primer modo representa la fluctuación estacional de las componentes u y v de la velocidad superficial en la cuenca mediterránea. Si observamos las gráficas del modo 1 espacial y del modo 1 temporal, podemos observar como en los meses de diciembre y enero la intensidad de dicha velocidad superficial es máxima, mientras que en los meses de mayo, junio y julio la intensidad es mínima. En el modo 2 también se puede observar una fluctuación estacional pero con un máximo en febrero y un mínimo en noviembre. En el tercer modo se puede observar una fluctuación con dos máximos y dos mínimos a lo largo del año. Los mínimos se producen entre los meses de enero-febrero y julio-agosto y los máximos entre los meses de abril-mayo y octubre-noviembre. El resto de los modos aunque completan hasta más del 90% de la varianza de la muestra, no tienen un significado físico claro.

Dentro de los resultados obtenidos para las componentes u y v de la velocidad de la corriente superficial, se detecta la aparición y desaparición a lo largo de la costa Africana de la corriente de Argelia. En el capítulo dedicado a la introducción de esta Tesis, se ha descrito la corriente de Argelia como una corriente superficial costera de agua atlántica (AW), que entra en el Mar Mediterráneo a través del Estrecho de Gibraltar y que una vez que alcanza el Estrecho de Sicilia, se bifurca en dos ramas (esta corriente costera es muy inestable y forman muchos eddies a lo largo de la costa Africana. Es por esta razón por la que cuenca de Argelia está caracterizada por una gran actividad de mesoscala), una rama entra en la cuenta este mediterránea, mientras que la otra permanece en la cuenca oeste, gira y se desplaza hacia el Norte, siguiendo las costas de las islas de Córcega y Cerdeña, hasta llegar a las costas francesas. Esta corriente se llama corriente del Norte (Millot, 1999) y se puede percibir como esta corriente fluye por lo menos, hasta el canal de Ibiza. A lo largo de todo el recorrido del agua atlántica desde su aparición a través del Estrecho de Gibraltar (AW), hasta que alcanza las costas francesas y el canal de Ibiza, sus propiedades son muy diferentes y varían significativamente (MAW).

A continuación se analiza mediante la técnica SOM, la serie temporal de 20 años (medias cada 5 días), de las componentes u y v de la velocidad de la corriente superficial obtenida para la cuenca mediterránea.

6.3. Redes Neuronales Auto-Organizativas (SOM).

Las SOM son redes neuronales competitivas utilizadas para detectar automáticamente grupos de patrones similares (prototipos) en un conjunto de datos disponible. Se hacen adecuadas para este estudio porque están especialmente indicadas para trabajar en espacios de alta dimensionalidad, ya que permiten organizar y visualizar los datos de forma intuitiva y eficiente proyectándolos en un espacio arbitrario.

En la figura 6.2, se muestra la estructura de una SOM. La capa de entrada contiene los datos a clasificar con una neurona para cada dimensión del espacio de datos $x=(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, mientras que la capa de salida presenta tantas neuronas como grupos distintos se quieran obtener. Cada grupo C_k está definido por 2 vectores, un vector de posición en la red de proyección $c_k=(i_k, j_k)$, en este caso bidimensional, y un vector de pesos (prototipo) $v_k=(v_{k1}, \dots, v_{kn})$, que representa a la clase en el espacio de los datos, y por tanto, con la misma dimensión que el espacio de datos original.

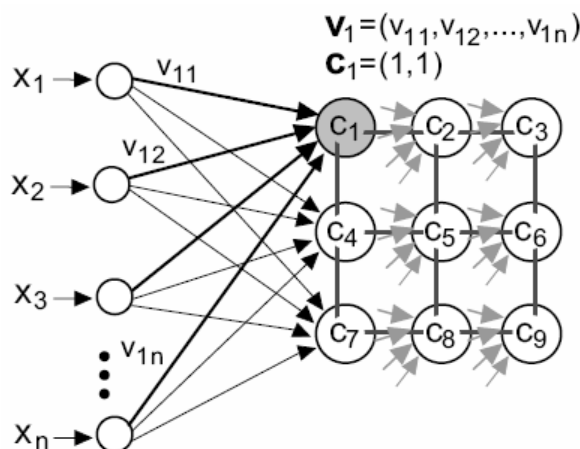


Figura 6.2. Esquema de una red auto-organizativa con 9 neuronas (3x3), organizadas en una red 2D.

(Fuente: Gutiérrez et al., 2004)

El algoritmo de aprendizaje no supervisado comienza con una inicialización aleatoria de los vectores de referencia v_k , adaptando de forma iterativa el vector de referencia mediante la minimización de una distancia global entre grupos $d(C_k)$, definida como la distancia entre los vectores de entrada x_i , y el vector de referencia correspondiente v_k para cada grupo:

$$\sum_{k=1, \dots, m} d(C_k) = \sum_{k=1, \dots, m} \sum_{x_i \in C_k} \|x_i - v_k\|^2 \quad 6.6$$

donde m , es el número total de grupos.

El algoritmo de entrenamiento se ejecuta iterativamente en ciclos, en los cuales se recorren todos los datos de entrada. En cada ciclo de entrenamiento se considera cada vector de entrada x_i , y se calcula el vector de referencia “ganador” $v_{w(i)}$ como el vector más próximo al vector de entrada:

$$\|x_{w(i)} - x_i\| = \min_k \{\|x_{w(i)} - x_i\|, k = 1, \dots, m\} \quad 6.7$$

donde $1 \leq w(i) \leq m$, indica el índice del vector de referencia ganador.

El proceso de entrenamiento de este algoritmo de clasificación incluye un núcleo espacial de vecindad en la rejilla de la SOM, cuyo efecto es mantener unidos en espacio de los datos de aquellos centroides vecinos en la rejilla 2D. Por tanto, este término de vecindad produce no sólo que el vector de referencia ganador se desplace hacia el vector de entrada, también los centroides vecinos de este vector de referencia ganador en la rejilla 2D son modificados de la siguiente forma:

$$v_k = v_k + \alpha h(\omega(i), k)(x_i - v_k), k = 1, \dots, m \quad 6.8$$

donde $1 \geq \alpha \geq 0$, es la tasa de aprendizaje que controla la velocidad de proceso de aprendizaje. Un valor pequeño de este parámetro da lugar a un proceso de aprendizaje lento y suave, mientras que un valor elevado de este parámetro supone un aprendizaje rápido e inestable.

La función $h_{(j,k)}$ es el núcleo de vecindad, centrada en el vector c_j , la cual determina la tasa de cambio alrededor del vector ganador. Normalmente se considera una función de tipo Gaussiano:

$$h(j, q) = \exp\left(-\frac{\|C_j - C_q\|}{\sigma}\right) \quad 6.9$$

Como consecuencia de la inclusión de un núcleo de vecindad, durante el proceso de entrenamiento iterativo, la SOM se comporta como una rejilla flexible adaptándose a la nube de datos de entrada en el espacio original n-dimensional. La tasa de crecimiento α y la amplitud del núcleo de vecindad σ , decrecen de forma monótona durante el entrenamiento, haciendo local la noción de vecindad cuando finaliza el entrenamiento. De esta forma, una vez finalizado el entrenamiento, los centroides vecinos están también próximos en la rejilla 2D. Se suele considerar un decaimiento lineal hasta 0 para estas funciones.

El proceso de aprendizaje proyecta la estructura topológica del espacio de datos en la rejilla prefijada. Esta rejilla proporciona un soporte natural con dos objetivos. El primer propósito es de visualización, la alta dimensionalidad de los datos de entrada es proyectada a una dimensionalidad inferior convirtiendo esta rejilla en un medio eficaz de visualizar las relaciones entre los grupos y haciendo más sencillo el análisis de los resultados. Otro objetivo que se consigue al proyectar las distribuciones en el espacio real de entrada a la rejilla 2D es transformarlas en funciones de densidad de distribución (PDF) sobre la rejilla.

6.3.1. Aplicación de las SOM para organización de los resultados

A partir del estudio realizado en el apartado anterior (EOF) de las series temporales (20 años) de las componentes u y v de la velocidad superficial (m/s) en el Mar Mediterráneo, se han simplificado los resultados obtenidos por el modelo MEDiNA. Esto ha sido posible gracias a la proyección de todo el conjunto de datos en un nuevo espacio de menor dimensión, donde las nuevas variables representan aquellas direcciones del espacio donde los datos tienen mayor varianza.

A continuación, se analizarán dichos resultados simplificados mediante SOM, para obtener patrones que expliquen las relaciones observadas entre dichos los datos.

6.3.1.1. SOM en el Mar Mediterráneo

Mediante la técnica de EOF, aplicada en el apartado anterior para la serie temporal de las componentes u y v de la velocidad superficial en el Mar Mediterráneo, se han obtenido 23 modos a partir de los cuales se explica el 99% de la varianza de la muestra total. Para realizar el estudio de dichos datos a partir de las SOM, se han seleccionado los 15 primeros modos. El motivo por el que se escogen dicho número de modos es porque con ellos se explica ya el 98% de la muestra (Ver tabla 6.1). Los datos que se han utilizado para generar las SOM, son las variaciones temporales de cada uno de los 15 primeros modos.

Se ha generado una SOM de dimensión 9x9 y se han obtenido 81 patrones del módulo de la velocidad superficial en la cuenca mediterránea, que se muestran a continuación colocados de forma consecutiva en columnas, en la figura 6.3.

Si se observa la figura 6.3, se puede ver como algunos de los patrones dibujados están en blanco. Esto se debe a que la SOM utiliza un espacio topológico continuo para obtener patrones, y aunque exista un patrón que no sea representativo de ningún dato de la muestra (como es el caso de todos los patrones que están en blanco), la SOM lo representa. Para poder entender mejor este concepto, se puede pensar en una malla o tela que se extiende cubriendo todos los datos y que simboliza el espacio continuo donde la SOM calcula los patrones (Figura 6.4).

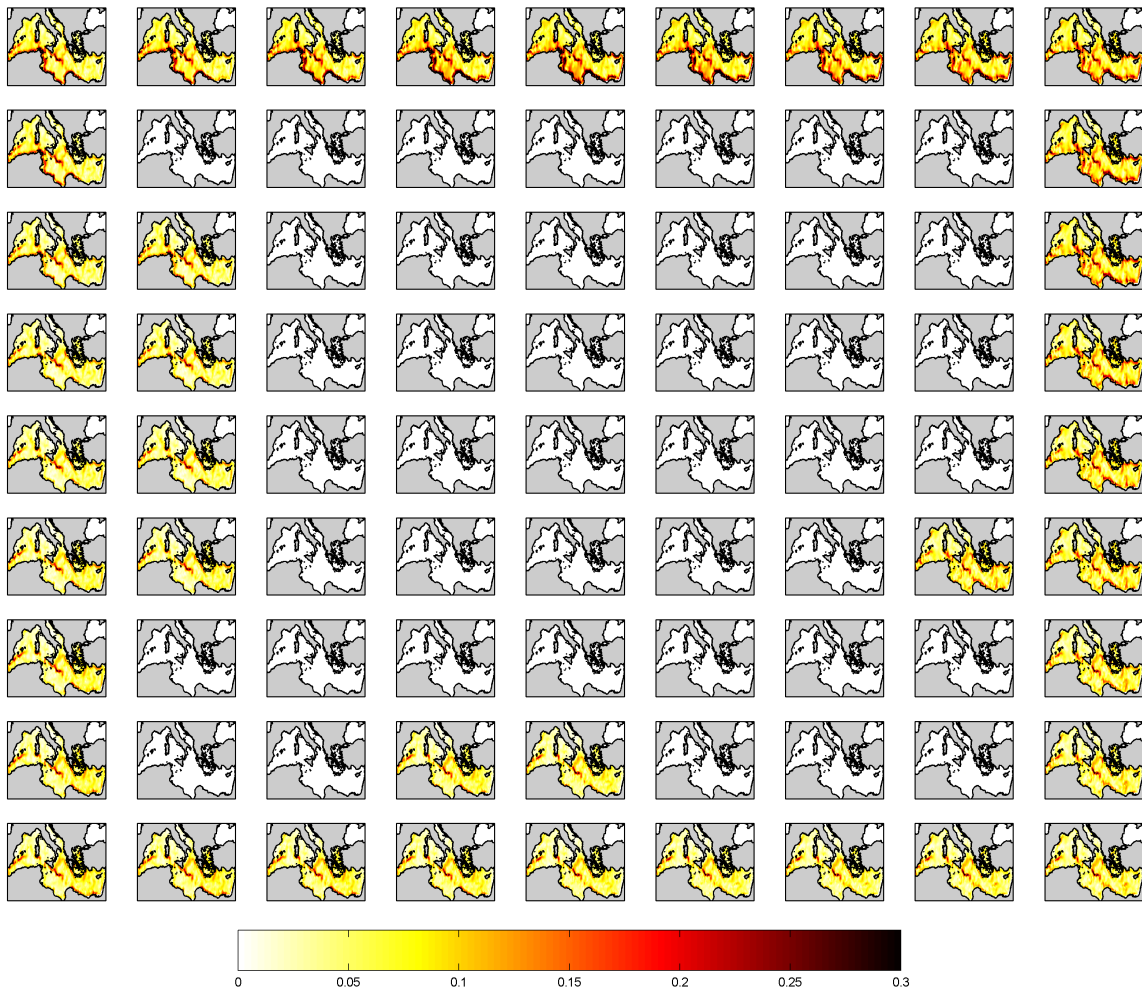


Figura 6.3. Patrones del módulo de la velocidad superficial (m/s), en la cuenca mediterránea.

PATRON 1	PATRON 10	PATRON 19	PATRON 28	PATRON 37	PATRON 46	PATRON 55	PATRON 64	PATRON 73
PATRON 2	PATRON 11	PATRON 20	PATRON 29	PATRON 38	PATRON 47	PATRON 56	PATRON 65	PATRON 74
PATRON 3	PATRON 12	PATRON 21	PATRON 30	PATRON 39	PATRON 48	PATRON 57	PATRON 66	PATRON 75
PATRON 4	PATRON 13	PATRON 22	PATRON 31	PATRON 40	PATRON 49	PATRON 58	PATRON 67	PATRON 76
PATRON 5	PATRON 14	PATRON 23	PATRON 32	PATRON 41	PATRON 50	PATRON 59	PATRON 68	PATRON 77
PATRON 6	PATRON 15	PATRON 24	PATRON 33	PATRON 42	PATRON 51	PATRON 60	PATRON 69	PATRON 78
PATRON 7	PATRON 16	PATRON 25	PATRON 34	PATRON 43	PATRON 52	PATRON 61	PATRON 70	PATRON 79
PATRON 8	PATRON 17	PATRON 26	PATRON 35	PATRON 44	PATRON 53	PATRON 62	PATRON 71	PATRON 80
PATRON 9	PATRON 18	PATRON 27	PATRON 36	PATRON 45	PATRON 54	PATRON 63	PATRON 72	PATRON 81

Figura 6.4. Ejemplo de una malla o tela que cubre todos los datos analizados por la SOM y que simboliza el espacio continuo donde ésta calcula los patrones.

Dentro de cada patrón se agrupan datos muy parecidos que caracterizan un instante de tiempo determinado. Esto se puede ver con claridad en el figura 6.5, donde se muestra el histograma del número de datos que cae en cada patrón. Los patrones 7, 8, 27, 54 y 72 son los que contienen más número de datos, mientras que los patrones 11, 16, 17, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 65, 66, 67, 68, 70 y 71 están vacíos y no representan ningún dato de la muestra.

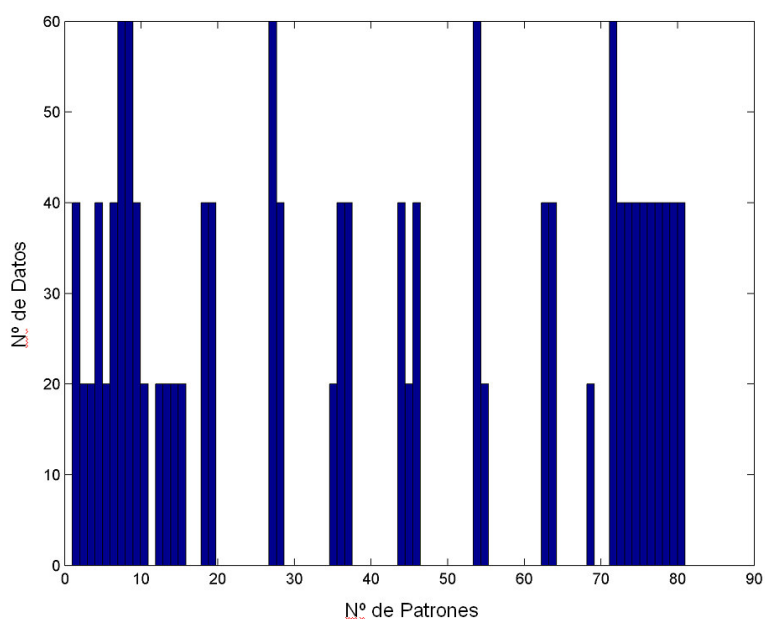


Figura 6.5. Histograma del número de datos que caen en cada patrón.

Si se observa la figura 6.6, donde se muestra la frecuencia de presentación de los datos que se agrupan en cada patrón, se puede ver que tal y como se ha comentado anteriormente, los patrones 7, 8, 27, 54 y 72 son los patrones en los que se agrupan más datos (60 datos en cada patrón), mientras que en los patrones 2, 3, 5, 10, 12, 13, 14, 15, 35, 45, 55 y 69 se agrupan 20 datos en cada uno. Además, se puede ver que todos los patrones que representan los datos de la muestra se disponen de forma consecutiva, es decir, todos los datos se agrupan en patrones vecinos.

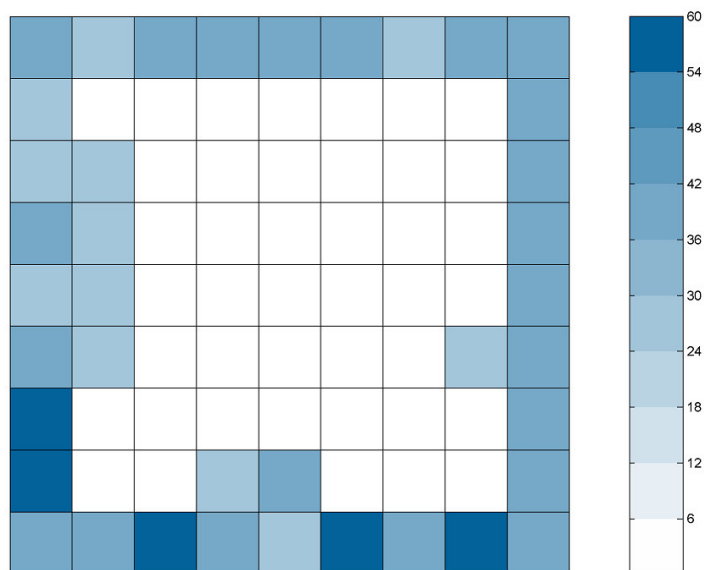


Figura 6.6. Frecuencia de presentación de los datos.

A continuación, se muestra cómo se colocan los datos por meses, dentro de cada patrón así como su probabilidad de presentación. En la figura 6.7, se puede observar como los datos que pertenecen a los mismos meses, se agrupan dentro del mismo patrón o en patrones vecinos (los números que se sitúan dentro de los cuadrados indican el número de patrón).

Además, en la figura 6.7 se puede ver cómo existe la posibilidad de que un mismo patrón represente a datos de meses diferentes. Por ejemplo el patrón 74, representa patrones oceánicos que se producen durante el mes de enero y también, patrones oceánicos que se producen durante el mes de febrero. Esto muestra la correcta agrupación de los datos por patrones ya que, aunque los datos se muestren divididos en meses, la situación oceánica de los últimos días del mes de enero por ejemplo, se puede parecer más a la situación oceánica de los primeros días de febrero, que los primeros días de febrero a los últimos días de dicho mes.

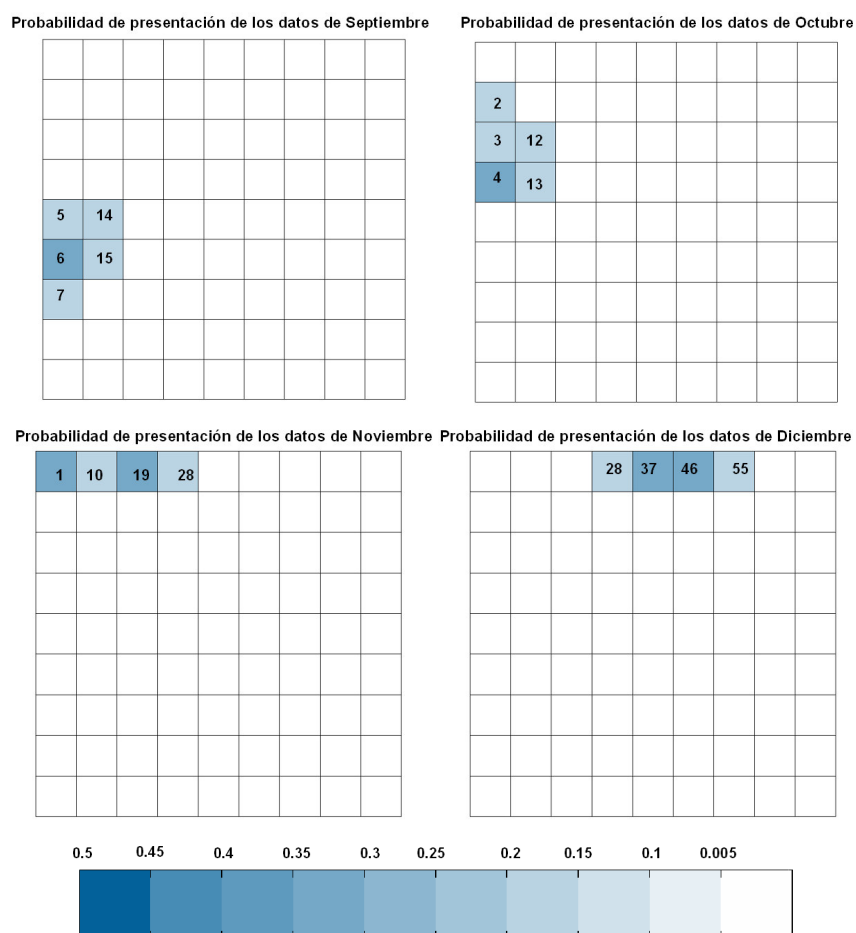


Figura 6.7. Probabilidad de presentación de los datos cada mes (los números que se sitúan dentro de los cuadrados coloreados indican el número de patrón).

En la tabla 6.2, se muestra cómo se agrupan los datos de la serie temporal analizada que corresponden a cada uno de los meses así como su probabilidad de presentación. Los datos que representan cada mes, se han agrupado en un mínimo de tres patrones y un máximo de cinco patrones distintos. Los meses que más patrones presentan, cinco, son septiembre y octubre. La probabilidad máxima de presentación es del 50% y la mínima es del 17%. Por lo tanto, se puede decir que existe una importante variabilidad en los datos de la serie temporal analizada, ya que estos se han agrupado en 39 patrones diferentes.

Meses	Patrones	Probabilidad de Agrupación
Enero	64	0,4
	73	0,4
	74	0,2
Febrero	74	0,16667
	75	0,3333
	76	0,3333
	77	0,16667
Marzo	77	0,16667
	78	0,3333
	79	0,3333
	69	0,16667
Abril	80	0,3333
	81	0,3333
	72	0,3333
Mayo	72	0,16667
	63	0,3333
	54	0,5
Junio	45	0,16667
	36	0,3333
	44	0,3333
	35	0,16667
Julio	27	0,5
	18	0,3333
	9	0,16667
Agosto	9	0,16667
	8	0,5
	7	0,3333
Septiembre	7	0,16667
	6	0,3333
	5	0,16667
	14	0,16667
	15	0,16667
Octubre	4	0,3333
	3	0,16667
	2	0,16667
	12	0,16667
	13	0,16667
Noviembre	1	0,3333
	10	0,16667
	19	0,3333
	28	0,16667
Diciembre	28	0,16667
	37	0,3333
	46	0,3333
	55	0,16667

Tabla 6.2. Patrones y probabilidad de agrupación de los datos de cada mes.

6.3.1.1.1 Trayectorias en el campo de la SOM del Mar Mediterráneo

El estudio de las trayectorias en el campo de la SOM, se puede enfocar como otra forma de ver la evolución o transición de las situaciones oceánicas y demostrar así, la correcta agrupación de los datos por patrones (Reusch, A. B y Alley, R. B. 2007).

En la figura 6.8, se puede ver el recorrido o la evolución de las situaciones oceánicas de la SOM estudiada. Para ello, se muestra en un gráfico de 2 dimensiones (conservando la proyección topológica), donde el círculo de color azul representa el inicio del recorrido (patrón 64), que se corresponde con el mes de enero, y el círculo de

color rojo representa el final del recorrido (patrón 55), que se corresponde con el mes de diciembre. Esto muestra la correcta agrupación de los datos por patrones ya que a lo largo de toda la serie temporal estudiada, la evolución de las situaciones oceánicas no presentan discontinuidades y los patrones del mes de diciembre siempre evolucionan hacia las situaciones oceánicas de enero, por lo que el ciclo anual es continuo.

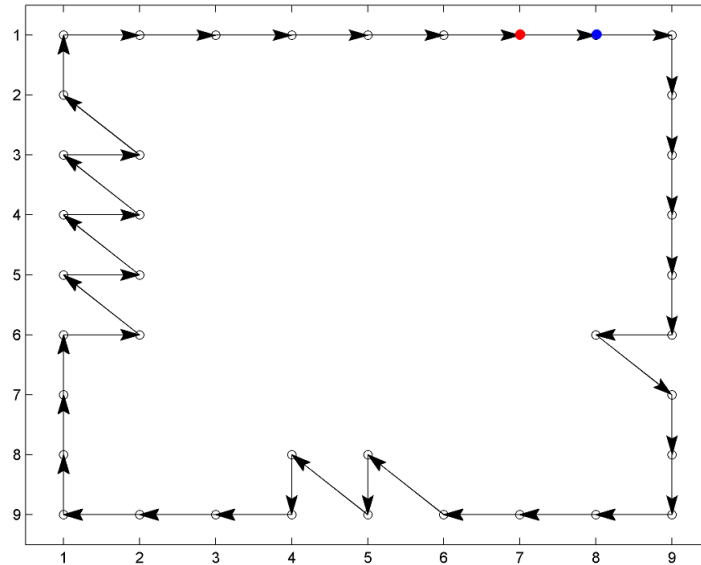


Figura 6.8. Recorrido de los patrones oceánicos en la cuenca mediterránea.

6.4. Relación entre los patrones de circulación atmosférica y oceánica en el Mar Mediterráneo.

A lo largo del capítulo 3 de esta Tesis, se han descrito las tensiones tangenciales que se han utilizado como forzamiento para el modelo MEDiNA y que proceden de la base de datos Hellerman (Hellerman y Rosenstein, 1983). Esta base de datos proporciona un promedio mensual de la tensión tangencial superficial del viento (dinas/cm^2), con una resolución espacial de 2° , tanto en longitud como en latitud. A continuación se muestra dicha base de datos para la superficie del Mar Mediterráneo (figura 6.9).

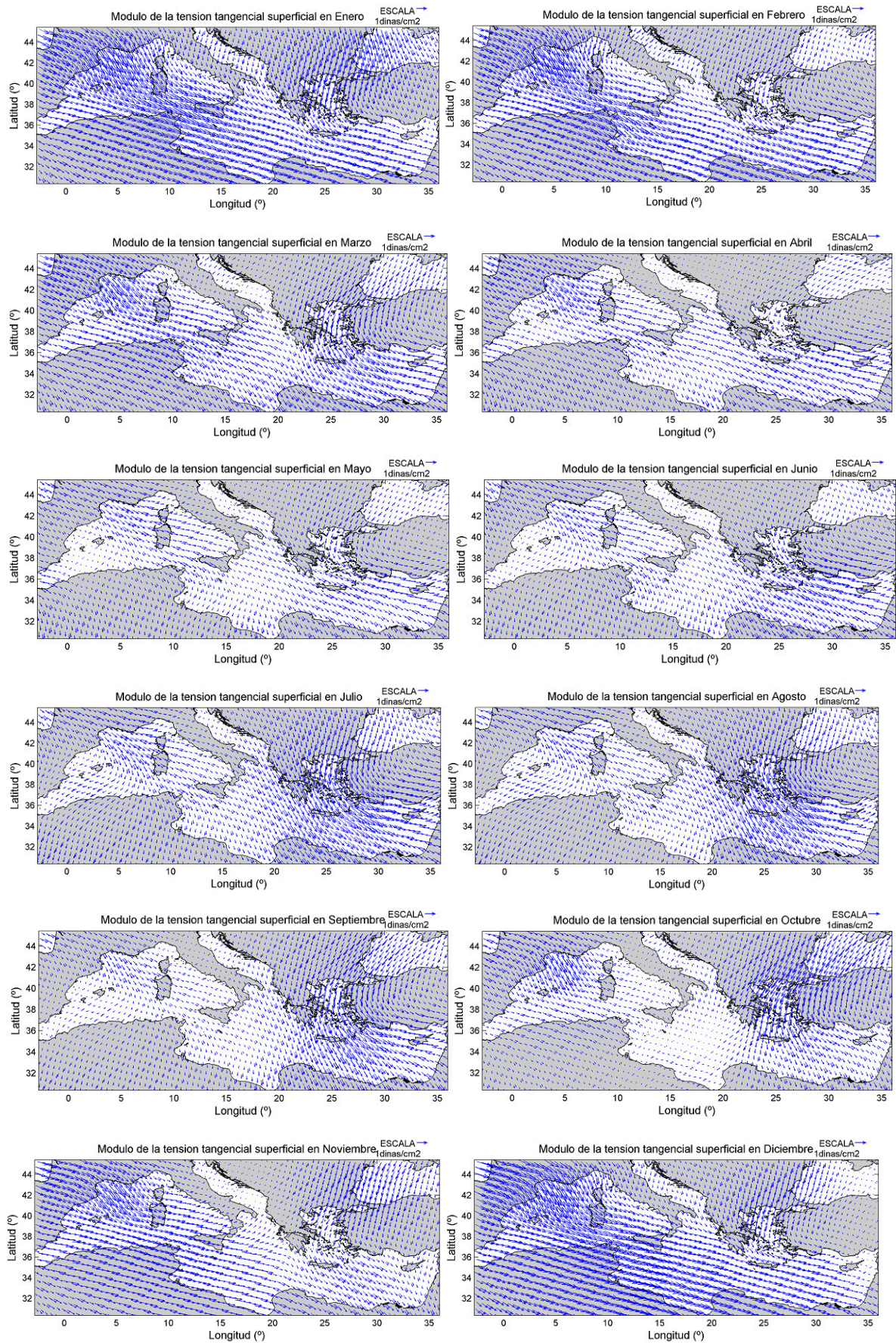


Figura 6.9. Campos de tensiones tangenciales superficiales (dinas/cm^2), proporcionados por la base de datos Hellerman, en la cuenca mediterránea (Fuente: Hellerman y Rosenstein, 1983).

El campo de flujo atmosférico en el Mediterráneo, está caracterizado por regímenes de viento subregional los cuales dependen en gran medida de la interacción de los vientos del Oeste con la orografía local durante los meses de invierno y del contraste de temperatura entre la tierra y el mar durante el verano (Pinardi et al., 2000). De la estructura de la tensión superficial del viento, que se muestra en la figura 6.9, se puede extraer que la dirección general de los vientos superficiales en los meses de invierno, es del Oeste. Al final de los meses de verano en la cuenca Este mediterránea, los vientos adquieren una fuerte componente del Norte y en la cuenca Oeste mediterránea llegan a girar hasta el punto de transformarse en vientos de componente Noreste. Estos dos regímenes de viento presentes en el Mar Mediterráneo se denominan Mistral y Etesian respectivamente. El Mistral es un viento del Noroeste (a veces del Norte), que sopla de las costas del Mediterráneo hacia el mar, entre la desembocadura del Ebro y Génova, durante los meses de invierno y el Etesian, es un viento del Noreste que sopla sobre el mediterráneo oriental y el mar Egeo, durante los meses de verano.

A lo largo de los capítulos anteriores de esta Tesis se ha explicado que en el modelo MEDiNA, se repite continuamente el ciclo climatológico anual. Aún así, se ha comprobado que existe una importante variabilidad interanual en los datos, ya que la SOM realizada para la serie temporal analizada en el apartado anterior, ha agrupado los datos en 39 patrones oceánicos diferentes. Aunque en un futuro muy cercano el análisis de los forzamientos tendrá que ser similar al análisis realizado a la serie temporal de las componentes u y v de la velocidad superficial, ya que se pretende incluir como forzamientos los proporcionados por de la base de datos NCEP (datos de reanálisis). En este momento se puede considerar que los 12 campos utilizados actualmente como forzamientos corresponden a los 12 patrones atmosféricos presentes en el Mar Mediterráneo.

A continuación, en la tabla 6.3, se muestran valores máximos y mínimos de la media (20 años), del módulo de la velocidad de las corrientes (m/s) y las tensiones tangenciales del viento (dinas/cm^2), para cada mes, en la cuenca mediterránea. Los valores máximos de la media (20 años) del módulo de la velocidad superficial, se producen en los meses de diciembre (0.73 m/s), noviembre (0.63 m/s) y abril (0.54 m/s), mientras que los valores máximos de las tensiones tangenciales se producen en los

meses de diciembre (0.11 dinas/cm²), enero (0.105 dinas/cm²), y febrero (0.11 dinas/cm²).

	Corrientes (m/s)		Tensión tangencial (dinas/cm ²)	
	máximo	mínimo	máximo	mínimo
Enero	0,44	0,003	0,105	0,01
Febrero	0,4514	0,001	0,1	0,009
Marzo	0,49	0,002	0,07	0,002
Abril	0,54	0,002	0,06	0,000665
Mayo	0,53	0,002	0,048	0,0009277
Junio	0,49	0,001	0,069	0,004
Julio	0,44	0,0008	0,0881	0,005
Agosto	0,42	0,001	0,09	0,002
Septiembre	0,43	0,00049	0,0793	0,002
Octubre	0,44	0,001	0,0689	0,001
Noviembre	0,63	0,0003	0,0821	0,00006
Diciembre	0,73	0,001	0,11	0,000391

Tabla 6.3. Valores máximos y mínimos de la media (20 años), del módulo de la velocidad superficial de las corrientes (m/s), y de las tensiones tangenciales del viento en superficie (dinas/cm²), para cada mes, en la cuenca mediterránea.

Se muestra a continuación para el patrón atmosférico correspondiente a diciembre, las diferentes situaciones oceánicas que se pueden dar y la probabilidad de que ocurra cada una de ellas. En la figura 6.10, se muestra el campo de tensiones tangenciales medio (dinas/cm²), la media (20 años) del módulo de la velocidad superficial (m/s), así como los cuatro patrones oceánicos (m/s) o situaciones que se pueden presentar a partir de la situación atmosférica media de diciembre.

De la misma forma que para el mes de diciembre, en el Anejo III de este documento, se muestra el campo de vientos medio (dinas/cm²) de enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre, así como las situaciones o patrones oceánicos (m/s) asociados a dichas situaciones atmosféricas y su probabilidad de ocurrencia.

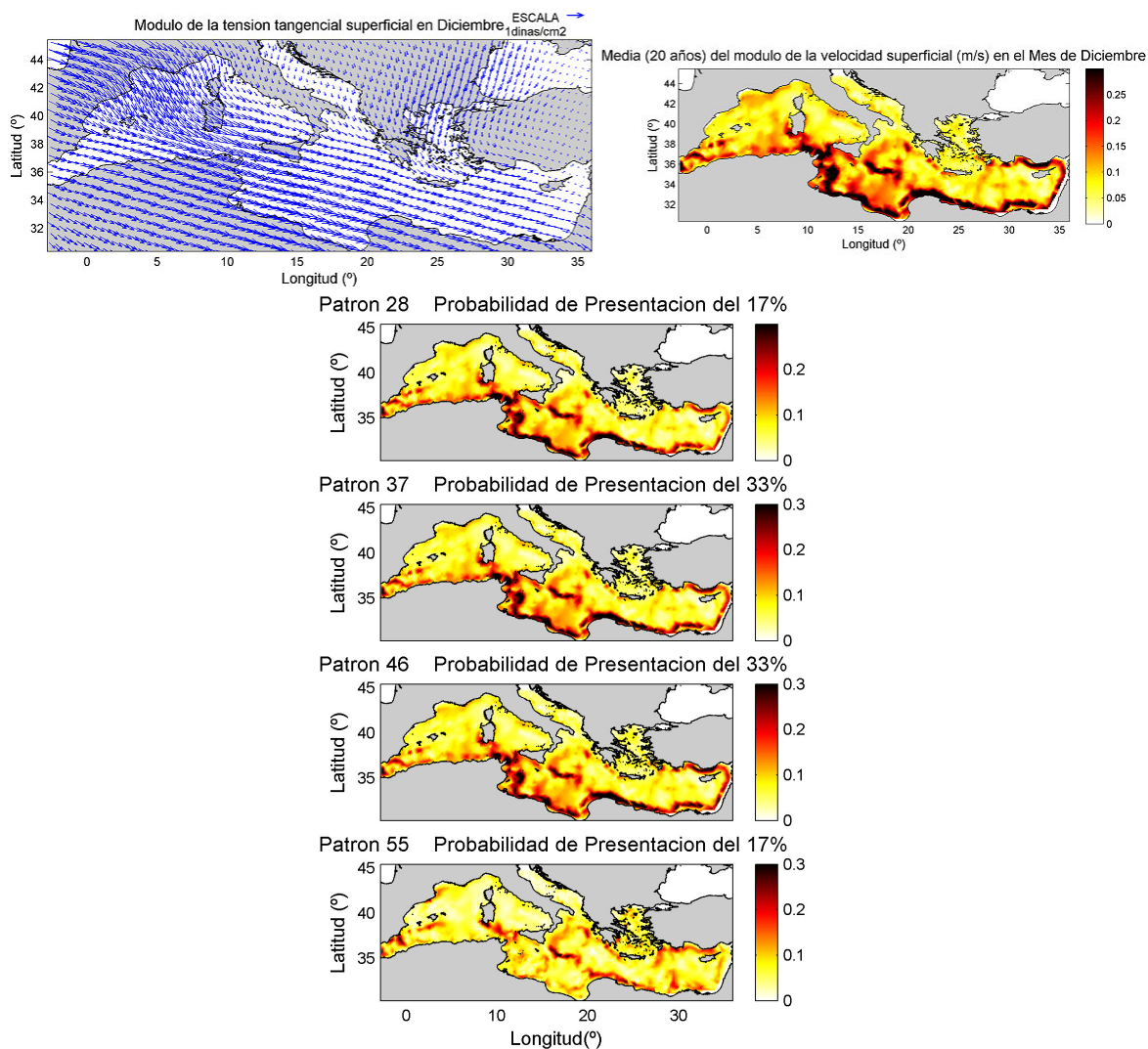


Figura 6.10. Tensión tangencial del viento en superficie (dinas/cm^2), media (20 años), del modulo de la velocidad superficial (m/s), y patrones oceánicos asociados (m/s), para el mes de diciembre.

El mes de diciembre presenta los mayores valores medios del módulo de la velocidad superficial de la corriente, 0.73 m/s , y de la tensión tangencial del viento, 0.11 dinas/cm^2 . Presenta 4 patrones oceánicos de los cuales el primero y el cuarto, tienen una probabilidad de ocurrencia del 17%, mientras que el segundo y el tercer patrón presentan una probabilidad de ocurrencia del 33% (Figura 6.10). El cuarto patrón (17% de probabilidad de ocurrencia) presenta unos valores mucho más bajos que el resto de los patrones oceánicos aun siendo el valor del forzamiento atmosférico máximo dentro de todos los meses. Esto muestra que los datos analizados presentan una importante variabilidad.

Tanto en la tabla 6.2, donde se muestran los patrones y probabilidad de agrupación de los datos de cada mes, como en la figura 6.7, donde se puede ver la probabilidad de presentación de los datos cada mes, se puede observar como muchas de esas situaciones oceánicas, se agrupan dentro de un mismo patrón y ese patrón a su vez, es probable para más de un mes. Este es el caso por ejemplo del patrón 74, que representa a una situación oceánica con probabilidad de ocurrencia del 20% en enero y del 0.17 % en febrero, o del patrón 72, que representa a una situación oceánica con probabilidad de ocurrencia del 33% en abril y del 0.17 % en mayo. Sin embargo, existen otros patrones que solo representan las situaciones oceánicas probables para un mes determinado. Esto se debe a que la variación entre unos meses y otros en general es pequeña, es decir, que el módulo de la velocidad (m/s), no cambia de manera significativa, excepto para los meses de noviembre y diciembre donde el módulo varía significativamente su intensidad (ver tabla 6.3).

En la figura 6.11, donde se muestra una gráfica de los valores máximos (adimensionalizados para que puedan ser comparados), del módulo de la velocidad superficial tanto de la corriente como de las tensiones tangenciales mensuales de la cuenca mediterránea, se puede apreciar que los valores máximos de las tensiones tangenciales no producen una respuesta inmediata en la superficie del océano. Además, el módulo de las corrientes no presenta grandes fluctuaciones, excepto para los meses de Noviembre y Diciembre. La propia inercia del océano hace que esta respuesta sea más lenta, es decir, que el océano presenta diferentes escalas temporales y como consecuencia, la tasa de variabilidad en el océano es diferente a la tasa de variabilidad del forzamiento atmosférico.

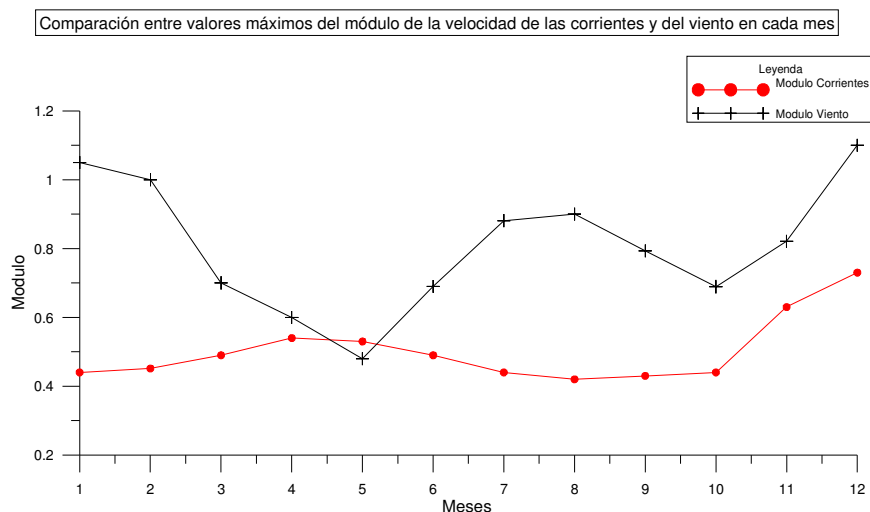


Figura 6.11. Comparación entre los valores máximos de la media (20 años), del módulo de la velocidad (adimensional), de las corrientes y del módulo (adimensional), de las tensiones tangenciales cada mes.

6.5. Patrones de circulación en el Golfo de Vizcaya

Una vez estudiados los patrones de circulación oceánica superficial y su relación con los patrones atmosféricos en el Mar Mediterráneo, se muestra a continuación el estudio realizado en la zona del Golfo de Vizcaya.

6.5.1. SOM en el Golfo de Vizcaya

A partir del estudio realizado mediante la técnica de los EOF a las series temporales (20 años) de las componentes u y v de la velocidad (m/s), en la capa superficial del modelo MEDiNA en el Golfo de Vizcaya, se han obtenido 288 modos a partir de los cuales, se explica el 99% de la varianza de la muestra total estudiada. Para realizar el estudio de dichos datos a partir de las SOM, se han seleccionado las variaciones temporales de cada uno los 40 primeros modos, puesto que con ellos se explica ya el 90% de la varianza de la serie temporal total.

El análisis de los datos se ha realizado de manera conjunta y se ha generado una SOM de dimensión 9x9, donde se han obtenido 59 patrones del módulo de la velocidad

superficial en el Golfo de Vizcaya. Dichos datos se muestran a continuación en la figura 6.12. Si se observa la SOM, se puede ver cómo algunos de los patrones dibujados están en blanco y como ya se ha descrito en el estudio de la cuenca mediterránea, esto se debe a que la SOM utiliza un espacio topológico continuo para obtener patrones, y aunque exista un patrón que no sea representativo de ningún dato de la muestra (como es el caso de todos los patrones que están en blanco), la SOM lo representa.

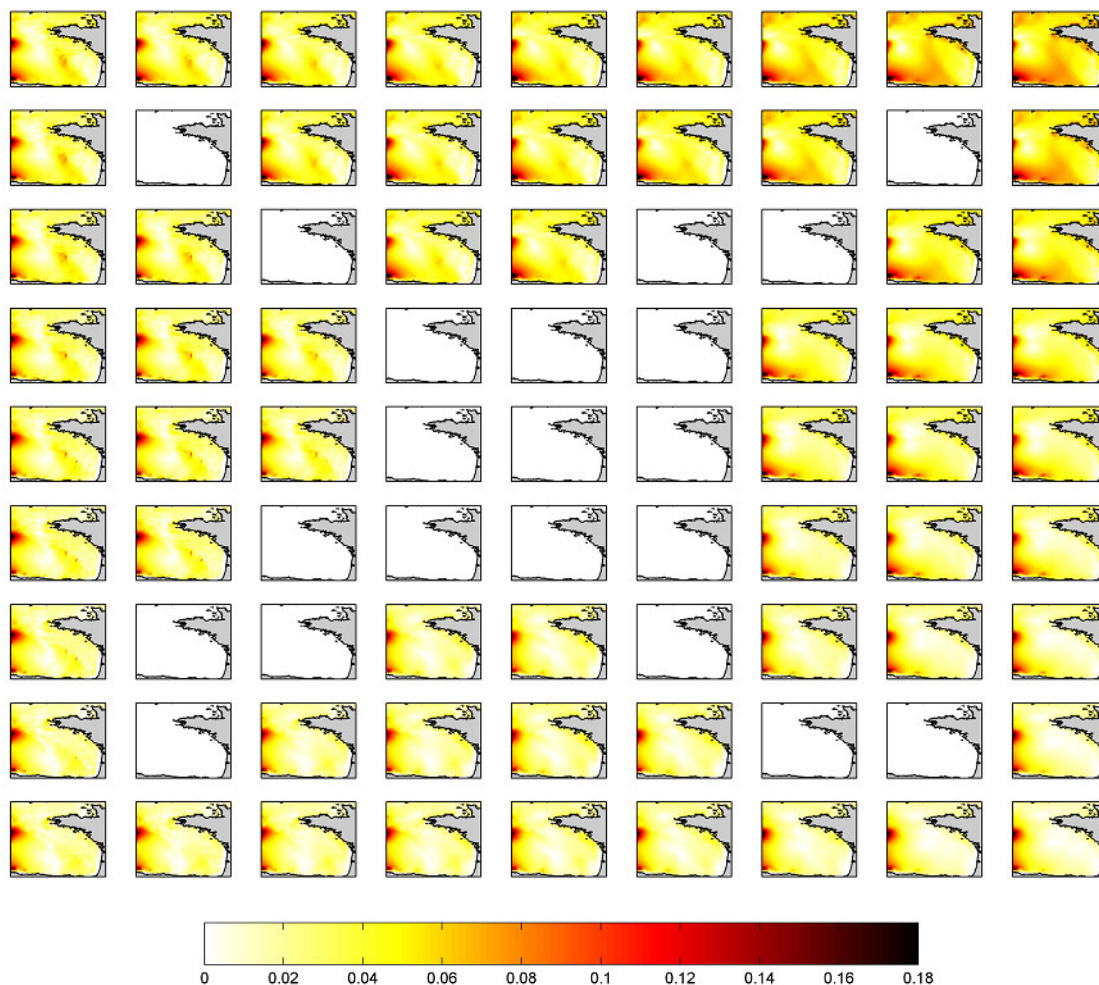


Figura 6.12. Patrones del modulo de la velocidad (m/s), para las 3 capas de profundidad estudiadas en el Golfo de Vizcaya.

Si se observa la figura 6.13 a, donde se muestra el histograma del número de datos o situaciones oceánicas que cae dentro de cada patrón, se puede ver que el patrón que más datos contiene es el 80, mientras que los patrones 27, 36, 37, 45, 46, 47, 54, 55, 56, 57, 64, 65, 66, 67, 68, 73, 74, 82 y 83 están vacíos y no representan a ninguna situación oceánica de la muestra. En la figura la figura 6.13 b, se muestra la frecuencia

de presentación de los datos que se agrupan dentro de cada patrón y también se puede ver como el patrón 81 es el patrón en el que se agrupan más situaciones oceánicas (78 datos), mientras que en los patrones 12, 15, 16, 22 y 58 se agrupan menos de 5 situaciones en cada uno.

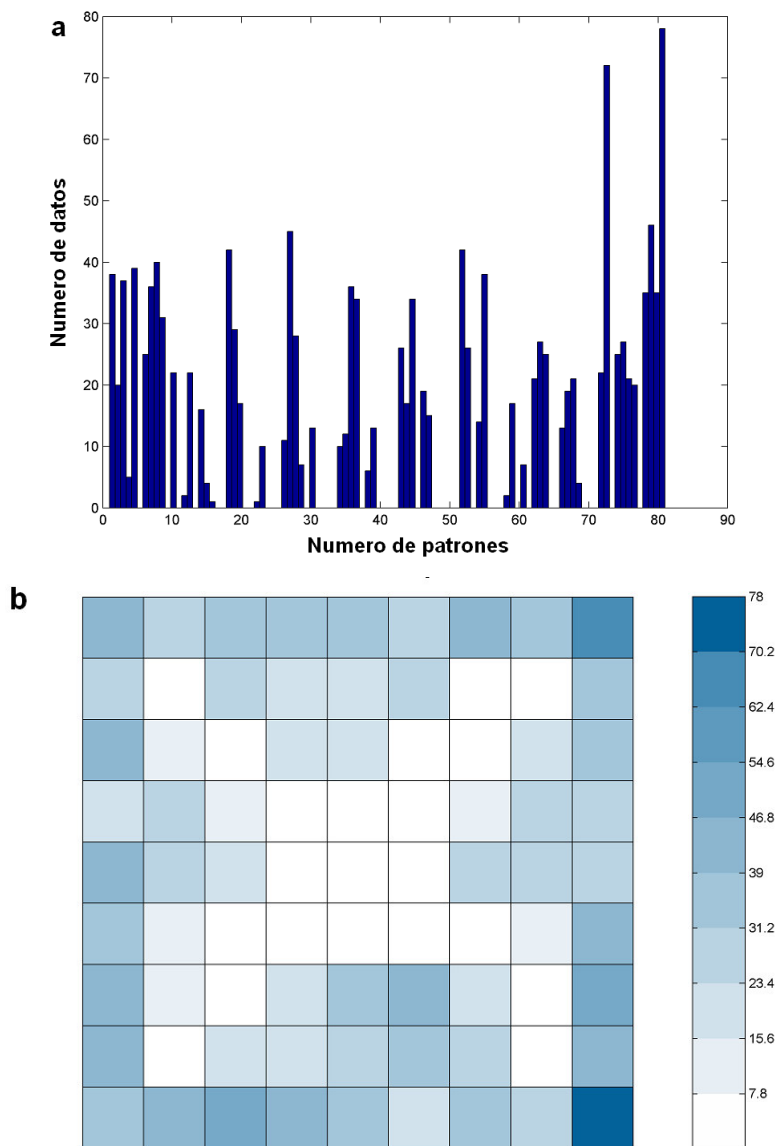


Figura 6.13. a, histograma del número de datos que caen en cada patrón y b, frecuencia de presentación de los datos de la SOM del Golfo de Vizcaya.

Como ya se ha dicho anteriormente, dentro de cada patrón se agrupan datos muy parecidos que caracterizan un instante de tiempo determinado. En la figura 6.14, donde se muestra cómo se colocan los datos por meses dentro de cada patrón, así como su probabilidad de presentación, se puede observar cómo los datos que pertenecen a los

Además, en la figura 6.14 se puede ver cómo existe la posibilidad de que un mismo patrón represente datos de meses diferentes. Por ejemplo, los patrones 52 y 53 representan patrones oceánicos que se producen durante el mes de julio y también, patrones oceánicos que se producen durante el mes de agosto. Los datos que representan a cada mes, se han agrupado en un mínimo de 3 patrones y un máximo de 9 patrones distintos (ver tabla 6.4). El mes que más patrones presenta, 9, es marzo. La probabilidad máxima de presentación de una situación oceánica determinada se produce en el mes de septiembre (patrón 81), y es del 50% y la mínima, se produce en los meses de marzo (patrón 22), abril (patrones 8, 16 y 23), junio (patrón 18), julio (patrón 34) y octubre (patrones 67 y 76) y es del 0.8%.

Meses	Patrones	Probabilidad de Agrupacion
Enero	28	0,17
	37	0,34
	38	0,06
	39	0,09
	46	0,19
	47	0,15
Febrero	1	0,14
	10	0,18
	19	0,24
	20	0,14
	28	0,09
	29	0,05
	30	0,1
	39	0,03
Marzo	1	0,17
	2	0,16
	3	0,3
	4	0,04
	12	0,01
	13	0,18
	14	0,025
	22	0,008
	23	0,07
	Abril	5
6		0,2
7		0,3
8		0,008
14		0,1
15		0,03
16		0,008
23		0,008
Mayo	8	0,3
	9	0,25
	18	0,34
	26	0,04
Junio	27	0,03
	18	0,008
	26	0,05
	27	0,34
	34	0,075
	35	0,1
Julio	34	0,008
	43	0,21
Agosto	44	0,14
	45	0,15
	52	0,2
	53	0,15
	54	0,11
	52	0,15
	53	0,05
Septiembre	61	0,05
	62	0,17
	63	0,22
	72	0,18
	81	0,5
Octubre	79	0,2
	80	0,29
	59	0,14
	67	0,008
	68	0,17
	69	0,03
	76	0,008
	77	0,16
	78	0,29
79	0,175	
Noviembre	58	0,01
	66	0,1
	67	0,15
	73	0,125
	74	0,2
Diciembre	75	0,22
	76	0,16
	55	0,31
	64	0,2
	73	0,49

Tabla 6.4. Patrones y probabilidad de agrupación de los datos de cada mes en el Golfo de Vizcaya.

6.5.1.1. Trayectorias de la SOM en el Golfo de Vizcaya

El estudio de las trayectorias en el campo de la SOM en el Golfo de Vizcaya, como ya se ha descrito en el caso del estudio de la cuenca mediterránea, se considera otra forma de ver la evolución o transición de las situaciones oceánicas y demostrar así, la correcta agrupación de los datos por patrones (Reusch, A. B y Alley, R. B. 2007).

En la figura 6.15, se puede ver el recorrido o la evolución de las situaciones oceánicas de la SOM estudiada. Para ello, se muestra en un gráfico de 2 dimensiones (conservando la proyección topológica), donde el círculo de color azul representa el inicio del recorrido (patrón 46) y el círculo de color rojo representa el final del recorrido (patrón 55). Esto muestra la correcta agrupación de los datos por patrones ya que aunque los datos se muestren divididos en meses, el patrón 55, que pertenece al mes de diciembre evoluciona hacia el patrón 46 que pertenece al mes de enero.

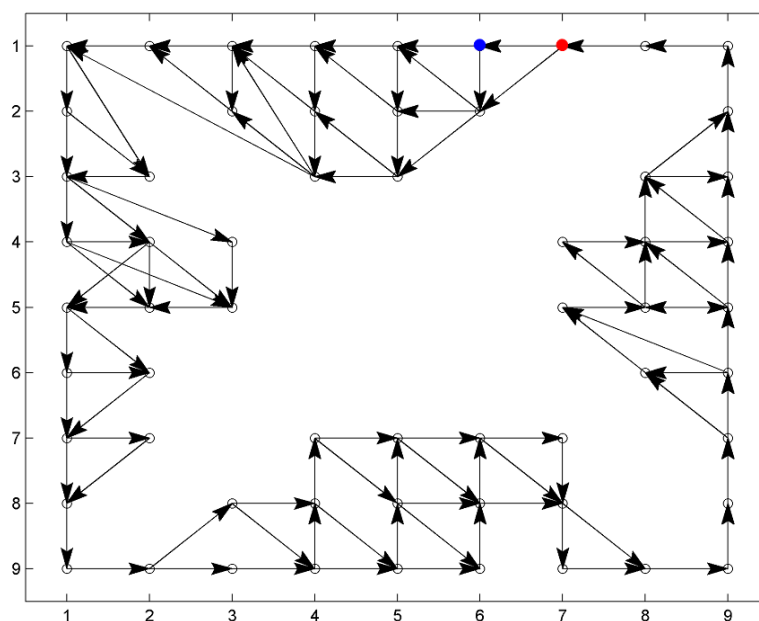


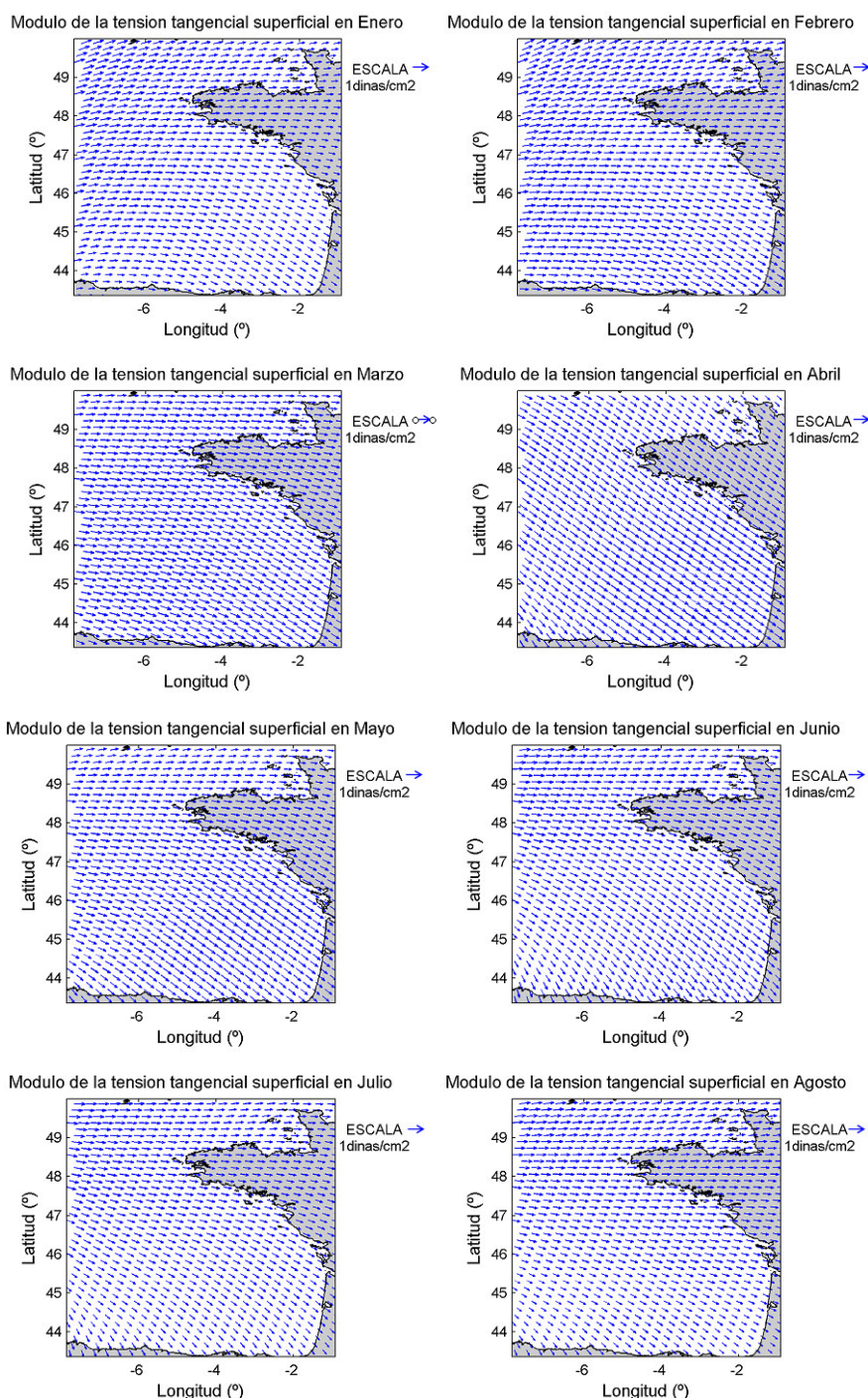
Figura 6.15. Recorrido de los patrones oceánicos en el Golfo de Vizcaya.

6.5.2. Patrones de circulación oceánica en el Golfo de Vizcaya

De la misma forma que se ha explicado para el caso del Mar Mediterráneo, se puede considerar que los 12 campos utilizados actualmente como forzamientos en el Golfo de Vizcaya y representados en la figura 6.16 (base de datos Hellerman y

Rosenstein (Hellerman y Rosenstein, 1983)) corresponden a los 12 patrones atmosféricos presentes en dicha zona.

De la estructura de la tensión superficial del viento que se muestra en la figura 6.16, se puede extraer que la dirección general de los vientos superficiales en los meses de invierno es del Oeste y que estos evolucionan hacia el Noroeste en los meses de verano perdiendo intensidad.



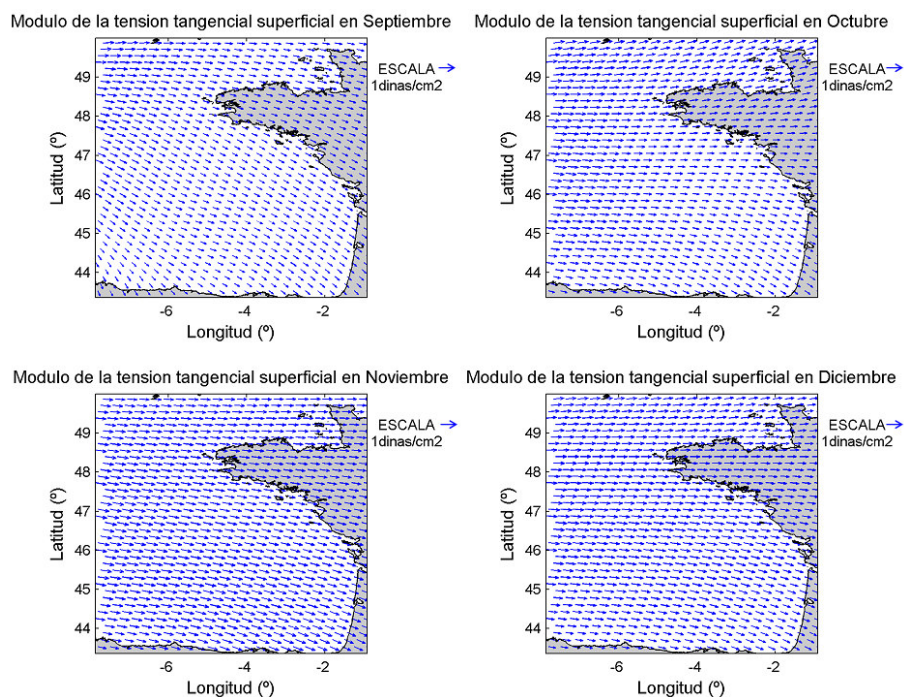


Figura 6.16. Campos de tensiones tangenciales superficiales (dinas/cm^2), proporcionados por la base de datos Hellerman, en el Golfo de Vizcaya.

A lo largo de esta Tesis, se ha explicado que en el modelo MEDiNA se repite continuamente el ciclo climatológico anual (año perpétuo). Aún así, se ha comprobado que en el Golfo de Vizcaya existe una importante variabilidad interanual en los datos, ya que la SOM realizada para la serie temporal analizada ha agrupado los datos en 59 patrones oceánicos diferentes.

Si se observa la tabla 6.5, donde se muestran los valores máximos y mínimos de la media (20 años) del módulo de la velocidad de la corriente superficial (m/s) y las tensiones tangenciales del viento (dinas/cm^2) para cada mes en el Golfo de Vizcaya, se puede ver que el valor máximo de la media (20 años) del módulo de la velocidad se produce en la 1ª capa y en el mes de diciembre (0.2144 m/s), al igual que el valor máximo de las tensiones tangenciales, se produce en el mes de diciembre (0.1348 dinas/cm^2).

	Corrientes superficiales máximas (m/s)	Tensión tangencial máxima (dinas/cm ²)
Enero	0,18	0,111
Febrero	0,1761	0,0772
Marzo	0,1509	0,0637
Abril	0,1583	0,046
Mayo	0,1466	0,0361
Junio	0,1436	0,097
Julio	0,1547	0,0529
Agosto	0,1694	0,0556
Septiembre	0,1737	0,0454
Octubre	0,1887	0,063
Noviembre	0,2099	0,079
Diciembre	0,2144	0,1348

Tabla 6.5. Valores mensuales máximos medios (de 20 años), del módulo de la velocidad de la corriente (m/s), y de las tensiones tangenciales del viento en superficie (dinas/cm²), en el Golfo de Vizcaya.

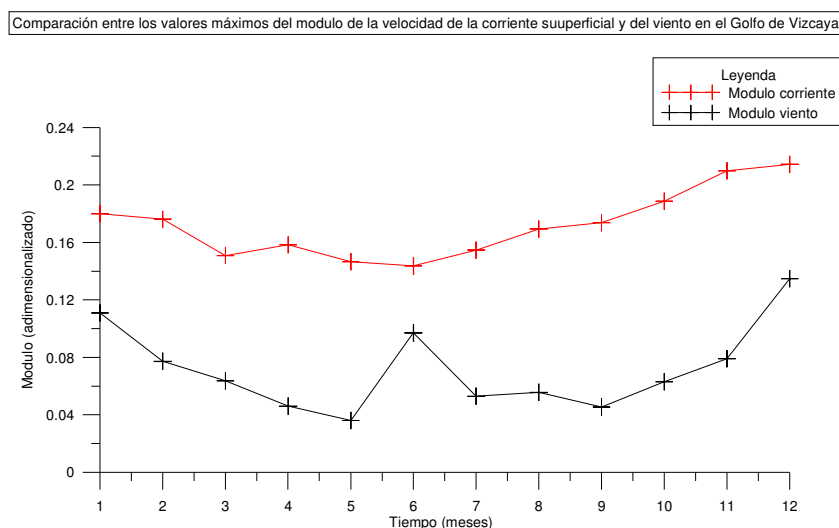


Figura 6.17. Comparación entre los valores mensuales máximos medios (de 20 años), del módulo de la velocidad (adimensional), de la corrientes superficial y del módulo (adimensional), de las tensiones tangenciales, en el Golfo de Vizcaya.

Se muestra a continuación en las figuras 6.18 y 6.19 la batimetría, las diferentes situaciones oceánicas (m/s) que se pueden dar y la probabilidad de que ocurra cada una de ellas, para los meses de enero y diciembre respectivamente. El motivo por el que se muestran las situaciones oceánicas posibles en los meses de enero y diciembre se debe a que es en estos dos meses donde la intensidad del viento superficial es mayor. Si comparamos las figuras 6.18 y 6.19, se puede ver como en diciembre se producen valores mayores del módulo de la velocidad de la corriente superficial y como las situaciones oceánicas con probabilidad de ocurrencia se agrupan en tres patrones

definidos por probabilidades de ocurrencia altas (31, 20 y 49%, respectivamente), mientras que en enero las situaciones oceánicas con probabilidad de ocurrencia son 6 y los patrones se encuentran definidos por un rango amplio de probabilidad, que van desde el 6% para el patrón 38, hasta el 34% para el patrón 37. Esto muestra la variabilidad de los resultados del modelo MEDiNA en Golfo de Vizcaya ya que aunque el modelose ha forzado con un año climático, las situaciones con probabilidad de presentación son distintas para cada mes.

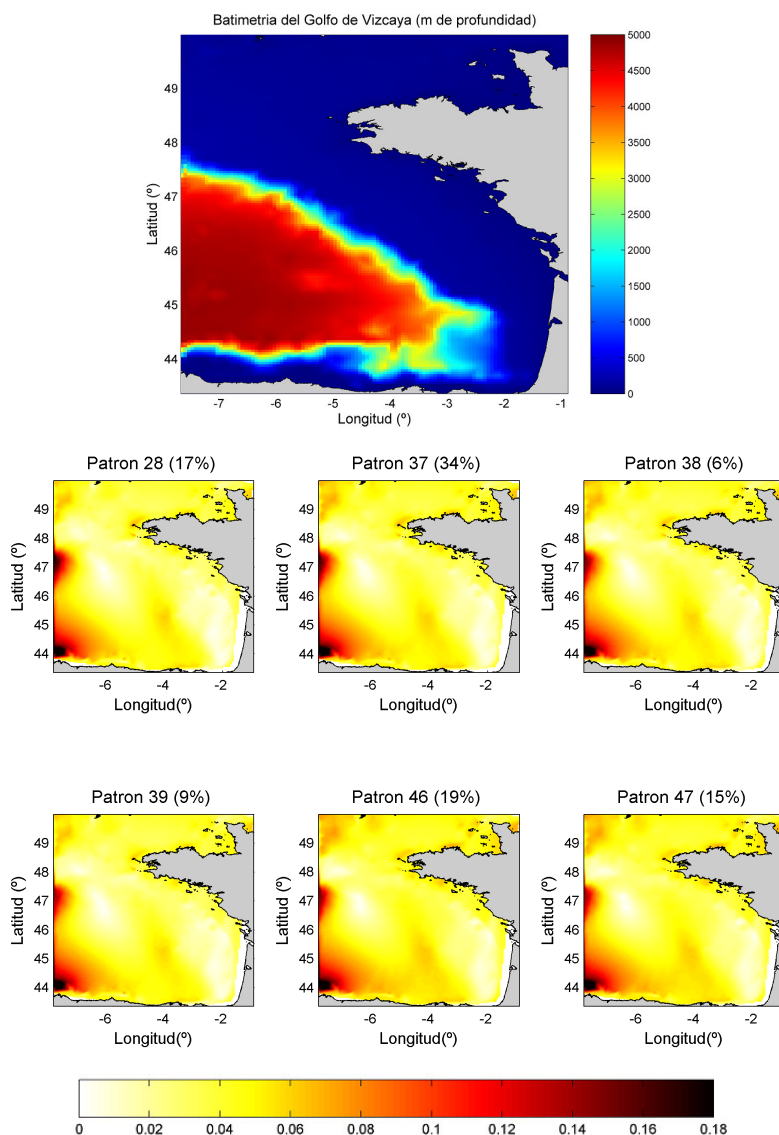


Figura 6.18. Batimetría y patrones oceánicos (m/s), con probabilidad de ocurrencia para el mes de enero en el Golfo de Vizcaya.

En ambas figuras (6.18 y 6.19), se puede ver que la corriente superficial se encuentra totalmente influenciada por los vientos superficiales y los patrones que se

obtienen son los patrones ligados a las distintas situaciones atmosféricas generales en el Golfo de Vizcaya, además si se observa la batimetría del Golfo de Vizcaya se puede ver como los patrones de circulación siguen la batimetría y rodean la plataforma. Se puede observar por ejemplo, como la corriente de talud entra en el Golfo de Vizcaya por Estaca de Bares para luego dirigirse hacia el Norte pegada al contorno de la plataforma.

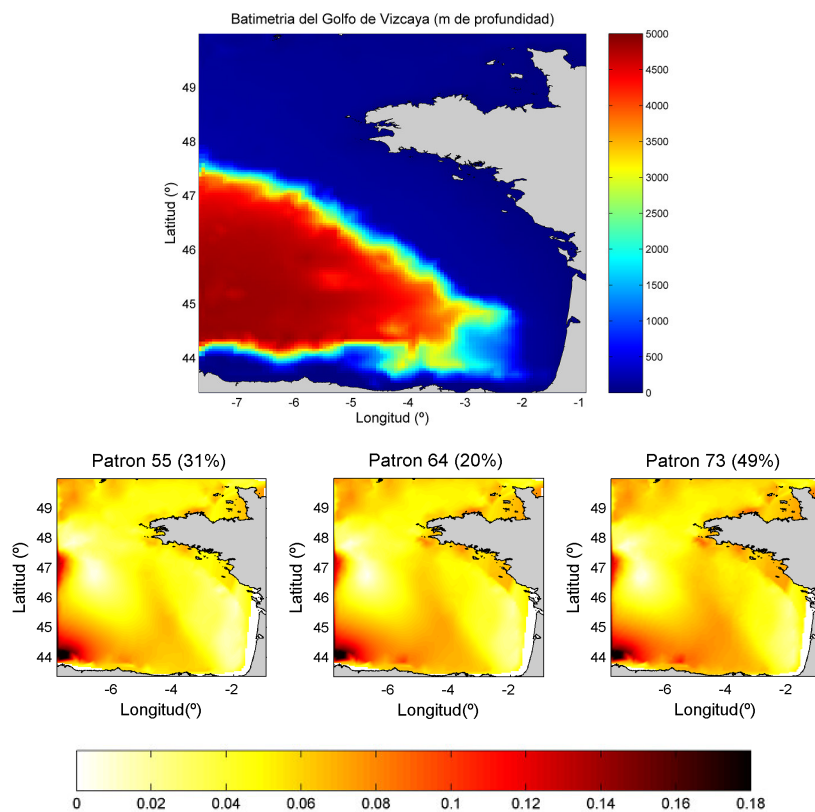


Figura 6.19. Batimetría y patrones oceánicos (m/s), con probabilidad de ocurrencia para el mes de diciembre en el Golfo de Vizcaya.

6.6. Conclusiones

Con el objetivo de obtener patrones de circulación oceánica en el litoral español, se han aplicado dos herramientas estadísticas para la exploración de los resultados logrados; la primera de ellas es la técnica estadística estándar, análisis de *Componentes Principales*, también denominada análisis de *Funciones Ortogonales Empíricas* (Empirical Orthogonal Function), EOF, y la segunda son las *Redes Neuronales Auto-Organizativas* (Self Organizing Maps, SOM).

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 han obtenido 23 modos con lo que se explica el 100% de la varianza de toda la muestra. Los seis primeros modos explican el 92% de la varianza y los 15 primeros modos explican el 98% de la varianza de la muestra. Se ha conseguido por tanto 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 la técnica SOM. Se ha generado una SOM de dimensión 9x9 y se han obtenido 81 patrones, de los cuales 39, contienen las diferentes situaciones oceánicas con probabilidad de ocurrencia en la cuenca mediterránea. 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 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. 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 Mar Mediterráneo. Tras dicho análisis, se ha podido observar como el mínimo de situaciones oceánicas probables para cada mes es tres (enero, abril, mayo, julio y agosto), mientras que el máximo es cinco (septiembre y octubre). Todas ellas, se parecen a la media (20 años) del módulo de la velocidad superficial (m/s) de cada mes, pero presentan diferencias que muestran la variabilidad de la propia muestra. 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.

Además 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 d 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.

Como conclusión final se puede decir que se ha demostrado que tanto los EOF, como las SOM, 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.