



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA
Escuela de Ingeniería Informática



DETECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ESTRUCTURAS DE MESO Y SUBMESOESCALA A PARTIR DE MODELOS DE PREDICCIÓN OCEÁNICOS

PROYECTO DE FINAL DE CARRERA

Autor: Álvaro Rubio Esparza

Tutores: José Daniel Hernández Sosa

Jorge Cabrera Gámez

Josep Isern González

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN

- 1.1. Oceanografía
- 1.2. Estructuras de Mesoescala
 - 1.2.1. Frentes
 - 1.2.2. Afloramientos
 - 1.2.3. Filamentos
 - 1.2.4. Giros
- 1.3. Importancia del estudio de los giros
- 1.4. Modelos de predicción oceánicos

2. OBJETIVOS, METODOLOGÍA Y RECURSOS

- 2.1. Objetivos del proyecto
- 2.2. Metodología de desarrollo
- 2.3. Recursos utilizados

3. ANÁLISIS

- 3.1. Estructuras de datos con las que se trabaja
- 3.2. Estado del arte
 - 3.2.1. Método de Nencioli
 - 3.2.2. Giros en la mesoescala mediante observaciones de altimetría
- 3.3. Caracterización del giro
- 3.4. Operador rotacional
- 3.5. Requisitos del software
 - 3.5.1. Requisitos funcionales
 - 3.5.2. Requisitos no funcionales
- 3.6. Casos de uso

4. DISEÑO

- 4.1. Diseño de la arquitectura
- 4.2. Proceso evolutivo de diseño
 - 4.2.1. Prototipo basado en redes neuronales
 - 4.2.2. Proceso de diseño de la detección de centros de giros
 - 4.2.3. Proceso de diseño estimación forma de giros basado en el rotacional
 - 4.2.4. Diseño método alternativo
- 4.3. Descripción del sistema en su forma final
 - 4.3.1. Caracterización manual de giros
 - 4.3.2. Caracterización automática de giros
 - 4.3.3. Método de comparación
 - 4.3.4. Eddy Tracker
- 4.4. Diseño de la interfaz gráfica de usuario
 - 4.4.1. Ejes
 - 4.4.2. Barra de herramientas
 - 4.4.3. Navegador temporal y de profundidad
 - 4.4.4. Botones de opciones

- 4.4.5. Creador y selector de giros
- 4.4.6. Estimar forma 3D del giro
- 4.4.7. Ubicar y dar forma al giro
- 4.4.8. Divisiones angulares y radiales
- 4.4.9. Guardar giros
- 4.5. Diagrama Funcional

5. IMPLEMENTACIÓN

- 5.1. Módulo de la caracterización manual
 - 5.1.1. eddy_manual_selection
 - 5.1.2. loadEddies_clickedCallback
- 5.2. Módulo de caracterización automática
 - 5.2.1. Método de detección de centros de giro
 - 5.2.2. Método basado en el rotacional
 - 5.2.3. Método basado en el ajuste de elipses
- 5.3. Módulo de comparación de resultados
 - 5.3.1. compare_eddy_data
- 5.4. Módulo del Eddy Tracker
 - 5.4.1. eddy_track

6. PRUEBAS REALIZADAS

- 6.1. Pruebas de la detección de centros
 - 6.1.1. Apreciación sobre la detección
- 6.2. Pruebas de la caracterización manual
- 6.3. Pruebas de la estimación por el rotacional
- 6.4. Pruebas de la estimación por el ajuste de elipses
- 6.5. Pruebas en otra región oceánica
- 6.6. Comparación visual

7. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

- 7.1. Conclusiones
- 7.2. Trabajo Futuro

8. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

9. ANEXO – DETALLES DEL USO DEL SISTEMA

1. INTRODUCCIÓN

En el presente documento se va a desarrollar la explicación del proyecto de final de carrera **Detección y Caracterización de Estructuras de Meso y Submesoescala a partir de modelos de predicción Oceánicas**.

Este primer capítulo presentará una introducción al contexto del proyecto, incluyendo tanto el área científica en que se desarrolla, la rama de la oceanografía, como el objeto particular de estudio, las estructuras de meso y submesoescala.

En sucesivos capítulos se detallará la realización del proyecto con los apartados de Análisis, Diseño, Implementación y Pruebas, culminando con las conclusiones y trabajos futuros.

1.1. OCEANOGRAFÍA

La oceanografía es una rama de las ciencias de la tierra que se dedica al estudio de los océanos. A su vez, la oceanografía física es una rama de la anterior que trata de entender los problemas relativos a las propiedades físicas del agua del mar, o bien, a los movimientos de las partículas fluidas que la componen; sin olvidar la acción recíproca del mar y de la atmósfera, por una parte, y del mar con el fondo oceánico, por otra.

La oceanografía física comprende dos actividades principales: la primera se dedica al estudio directo de las propiedades físicas del océano, como la temperatura, densidad, transparencia, presión, punto de ebullición, punto de congelación, calor específico, energía absorbida, entre otras; la segunda, es el estudio teórico de los procesos físicos del mar que intervienen en la circulación del agua oceánica para explicar su comportamiento.

Hay muchas razones para desarrollar el estudio de los océanos. Por ejemplo, el efecto de las corrientes marinas sobre la navegación y los diferentes efectos que estas corrientes pueden causar sobre las costas. Por otro lado, entender la interacción entre el océano y la atmósfera resulta clave para la investigación del comportamiento climático terrestre.

1.2. ESTRUCTURAS DE MESOESCALA

La dinámica oceánica está compuesta por una serie de fenómenos que se clasifican según su duración (escala temporal) y su extensión (escala espacial). Estos fenómenos pueden durar desde menos de un segundo, a años. Y medir desde centímetros a miles de kilómetros. En la figura 1.2.1 se muestra un esquema de las escalas temporal y espacial y los fenómenos que se producen.

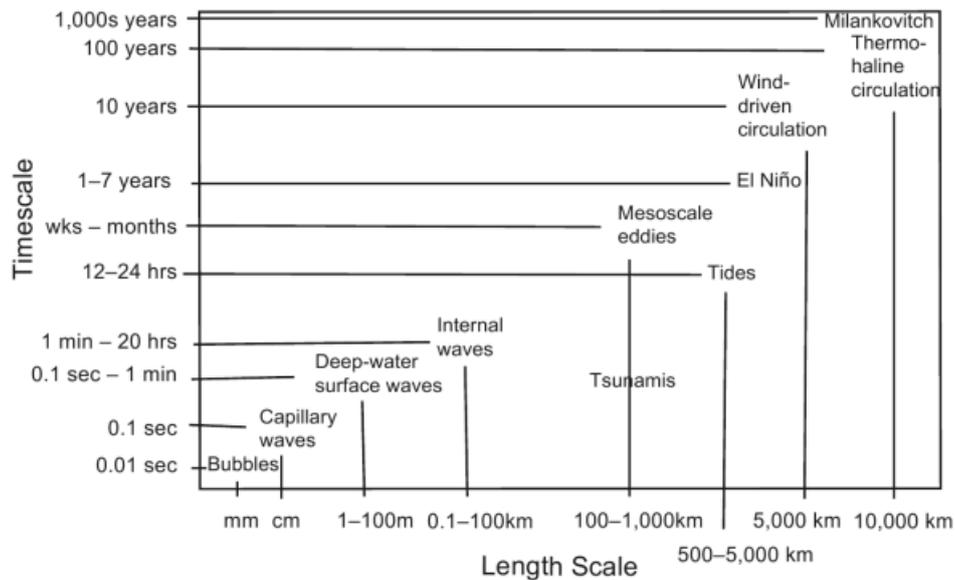


Figura 1.2.1

Gráfica que muestra tanto la escala temporal como la espacial y los fenómenos que se producen en cada medida. [Talley - 2011].

Las técnicas descritas en este documento están enfocadas al estudio de estructuras de meso y submesoescala. Las estructuras de mesoescala, como su nombre indica, son las estructuras de media escala, tanto temporal como espacial, que miden desde los 100 km a los 1000 km y duran desde semanas a meses. La submesoescala se sitúa por debajo de los 100 km en extensión, con una duración de unos pocos días.

Existen varios tipos de estructuras que podemos encontrar en el rango de la meso y submesoescala: frentes (fronts), filamentos (filaments), giros (eddies) y afloramientos (upwelling).

1.2.1. FRENTES

Los frentes oceánicos son límites horizontales a lo largo de la superficie marítima que se hallan entre masas de agua cuyas propiedades son diferentes (temperatura, salinidad, densidad) y cambian abruptamente. Estas estructuras son muy comunes en el océano y en general tienden a disminuir el gradiente de propiedades entre las masas de agua.

1.2.2. AFLORAMIENTOS

El afloramiento o upwelling es un fenómeno oceánico bien conocido, que se produce cuando el viento persistentemente desplaza la superficie marítima en un ángulo con respecto a él, haciendo que suba o aflore el agua del fondo. Los afloramientos también pueden estar producidos por otras razones, como los filamentos o giros.

El aporte de agua resultante de los afloramientos contiene muchos más nutrientes que las aguas superficiales desplazadas, con lo cual el estudio de este proceso es muy interesante. Por ejemplo, las oportunidades de pesca aumentan considerablemente en las zonas donde se produce este fenómeno.

1.2.3. FILAMENTOS

Los filamentos son estructuras de la submesoescala formadas por protuberancias angostas de aguas frías que comúnmente aparecen en las zonas marítimas cercanas a la costa y se proyectan mar adentro. Hay diversas causas que los generan, como factores topográficos, el viento y muy frecuentemente la interacción entre dos giros.

Los filamentos suelen tener de media longitudes de 100km de largo, 20 km de ancho, y su duración es del orden de más de 3 días.

Estas estructuras son importantes a nivel biológico ya que pueden generar afloramientos y al mismo tiempo desplazar las aguas ricas en nutrientes desde la costa a mar adentro.

En la figura 1.2.3.1 se muestra una simulación de un filamento. Se puede ver como sus aguas son más frías en comparación con sus alrededores.

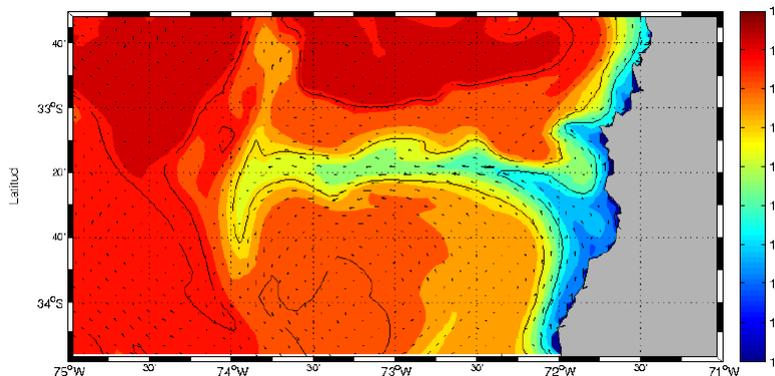


Figura 1.2.3.1

Simulación de un filamento mostrando la corriente y temperatura. En azul baja temperatura y en rojo alta temperatura. [Artal – 2010].

1.2.4. GIROS

Los giros, eddies en inglés, son vórtices o remolinos de corriente que generalmente se desprenden de las corrientes principales, o son generados al circular éstas a través de obstáculos como islas. Estas estructuras son muy dinámicas y pueden desplazarse cientos de kilómetros y durar meses. Existen dos tipos de giros: los giros anticiclónicos y los giros ciclónicos. Los giros anticiclónicos rotan en el sentido de las agujas del reloj y están formados por aguas cálidas. Por el contrario, los giros ciclónicos rotan en sentido antihorario y están formados por aguas frías.

En la figura 1.2.4.1 se muestra un ejemplo de giro ciclónico.



Figura 1.2.4.1

*Giro ciclónico. Es visible debido a que produce un afloramiento.
[[http://www.cazatormentas.net/foro/temas-de-meteorologa-general/los-'eddies'-\(remolinos\)-y-el-plancton-impresionante-fenomeno/](http://www.cazatormentas.net/foro/temas-de-meteorologa-general/los-'eddies'-(remolinos)-y-el-plancton-impresionante-fenomeno/)].*

Desde el punto de vista de la altimetría, los giros fríos están asociados a zonas donde la superficie del océano presenta valores de anomalía (desviación con respecto al valor de referencia) negativa. Los giros cálidos, en cambio, se corresponden con regiones de anomalía altimétrica positiva. Es decir, los giros fríos corresponden a hondonadas y los cálidos a montículos.

Este proyecto se centra en el estudio de estas estructuras, los giros, en el rango de la meso y la submesoescala. Se aborda tanto la detección de su ubicación como la estimación de su forma.

1.3. IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DE LOS GIROS

Los giros tienen una gran importancia tanto en procesos físicos del mar como biológicos. Estas estructuras desplazan agua de unas zonas a otras, por lo cual modifican las propiedades físicas del océano, ya que pueden, por ejemplo, transportar agua fría a zonas de aguas cálidas o agua salada a zonas con baja salinidad. Por esta característica algunos oceanógrafos definen a los giros como “la meteorología interna de los océanos”.

Por otro lado, y como se mencionó en el apartado anterior, los giros pueden generar el fenómeno del afloramiento. Por tanto, son beneficiosos para la vida marítima y también para los humanos, ya que su estudio puede proporcionar el conocimiento para mejorar las oportunidades de pesca.

Para los oceanógrafos es muy interesante caracterizar estas estructuras para entender mejor tanto el funcionamiento y propiedades físicas de los océanos, como su biología, más concretamente las especies de aguas profundas que puedan aflorar a la superficie. También pueden contribuir a definir mejor las áreas de flora y fauna marina.

La orografía y los regímenes de vientos son determinantes en la formación de los giros. Esto hace que existan regiones más favorables para la aparición de estas estructuras, dando lugar a lo que se denominan sistemas de giros. Algunos ejemplos relevantes son la costa de California, las Islas Baleares y las Islas Canarias.

1.4. MODELOS DE PREDICCIÓN OCEÁNICOS

Para el desarrollo del proyecto, se han utilizado como datos de entrada los mapas proporcionados por modelos de predicción oceánicos.

Los modelos oceánicos, son herramientas que sirven para evaluar y entender la dinámica de los océanos, simulando computacionalmente sus condiciones físicas, a través de variables como las corrientes, temperatura, salinidad o densidad. Están formados por un conjunto de ecuaciones que modelan el océano basándose en la dinámica de fluidos y otros procesos que pueden ser químicos o biológicos. Estas ecuaciones, en general, son expresadas como ecuaciones diferenciales parciales, que describen la evolución de sus variables en función de su valor presente.

Las ecuaciones que gobiernan un modelo de este tipo son, por lo general, demasiado complejas como para ser resueltas mediante el cálculo matemático clásico. Debido a ello, las ecuaciones se aproximan usando métodos numéricos computacionales que discretizan el área oceánica dividiéndola en celdas sobre las que se calculan las ecuaciones diferenciales. Cuanto mayor sea el número de celdas, mayor será la resolución del modelo, pero crece igualmente el coste computacional demandado para generar resultados.

Los modelos de predicción se dividen en dos grupos: los modelos globales y los regionales. Los modelos globales tratan de reflejar el comportamiento del océano del planeta en su totalidad. Un ejemplo de modelo global es el OGCM (Oceanic General Circulation Model), basado en las ecuaciones de Navier-Stokes. El OGCM predice la evolución tanto horizontal y vertical de las corrientes marítimas, como la temperatura y salinidad en cada nivel de profundidad.

Sin embargo, los modelos globales no son capaces de obtener una precisión adecuada localmente, ya que el número de celdas en las que se puede dividir el océano es limitado si se quiere calcular el modelo en tiempos aceptables. En estos casos se recurre a modelos regionales como los ROMS (Regional Oceanic Modeling System). Un ROMS actúa sobre un área delimitada del océano y permite obtener predicciones sobre la zona de estudio con un mayor detalle que las que se obtendrían usando un modelo global. De esta forma, es posible dividir el área objetivo en un mayor número de celdas para conseguir una mayor resolución, aumentando la precisión y fiabilidad del modelo a escala local.

La definición y dinámica de las estructuras de pequeño y medio tamaño no es, en general, capturada convenientemente por los modelos globales. Por este motivo, cuando el objetivo que se persigue es la caracterización de las estructuras de meso y submesoescala en la mayoría de las ocasiones será necesario recurrir a los modelos regionales.

2.OBJETIVOS, METODOLOGÍA Y RECURSOS

En este capítulo se indican los objetivos de este proyecto, así como la metodología seguida para su desarrollo y los recursos utilizados.

2.1. OBJETIVOS DEL PROYECTO

Como se ha explicado en la introducción, las estructuras oceanográficas y más concretamente los giros fríos/cálidos, son muy importantes a la hora del estudio de numerosos fenómenos físicos, químicos y biológicos que suceden en el medio oceánico. Para los oceanógrafos, resulta interesante el caracterizar de forma adecuada dichas estructuras para comprender mejor su funcionamiento y por lo tanto los fenómenos y procesos relacionados con las mismas.

El objetivo general del proyecto es el desarrollo de herramientas que permitan de forma sencilla detectar y caracterizar estas estructuras y los principales parámetros que las definen a partir de mapas de predicción. Para alcanzar este objetivo, el proyecto se ha estructurado en las siguientes fases:

1. Estudio de sistemas similares. Estado del Arte.

Resulta interesante conocer otros sistemas y herramientas que vayan en la misma línea del sistema que se pretende crear, ya que hay múltiples ideas en las que se puede basar, o que pueden ser aprovechadas e incluso mejoradas.

2. Desarrollo de un sistema de herramientas de caracterización manual de giros

El sistema deberá conseguir que de una forma intuitiva y sencilla el usuario pueda caracterizar tanto la ubicación y forma de los giros como otros parámetros como su velocidad de giro.

3. Desarrollo de un sistema de detección automática de giros

El sistema deberá detectar y estimar la forma de dichas estructuras en tiempos aceptables con altos índices de fiabilidad.

4. Comparativa de resultados

El sistema tendrá la opción de comparar la caracterización manual realizada por el usuario con la automática, y proporcionar una serie de indicadores objetivos sobre su grado de éxito.

2.2. METODOLOGÍA DE DESARROLLO

En este proyecto se ha optado por seguir un desarrollo basado en prototipos. El motivo de esta elección radica en que los requisitos del trabajo estaban definidos, pero no en profundidad ni detalladamente, y tampoco se sabía hasta dónde se podría llegar a la hora de la inclusión de funcionalidades y obtención de resultados. La metodología de desarrollo en prototipos constituye un proceso evolutivo en el que cada iteración consta de las siguientes fases secuenciales:

1. Recolección y refinamiento de requisitos.

Se definen, concretan, refinan y, si se da el caso, se añaden requisitos tanto de usuario como de software al proyecto.

2. Diseño rápido arquitectónico

Se define la estructura del software, especificando cada módulo y se estableciendo las interrelaciones que existen entre ellos.

3. Construcción del prototipo

Se implementa el prototipo con los requisitos establecidos más los cambios requeridos por la evaluación del prototipo anterior.

4. Evaluación del prototipo

Se evalúa el prototipo y se definen los cambios que se deben realizar en la siguiente iteración

2.3. RECURSOS UTILIZADOS

En el desarrollo de este proyecto se han utilizado los recursos que figuran a continuación.

- **RECURSOS HARDWARE**

- Procesadores: Intel Core i3, 3.2 GHz

- Memoria RAM: 4 Gb

- Disco duro: 290 Gb

- **RECURSOS SOFTWARE**

- Sistema Operativo: Windows 7

- Matlab R2011a

- **SERVIDORES DE DATOS**

- www.puertos.es

- www.myocean.eu

- ourocean.jpl.nasa.gov

- www.sccoos.org

- www.cencoos.org

3. ANÁLISIS

En este capítulo se desarrolla el análisis del proyecto, explicando las estructuras de datos con las que se trabaja, seguido del estado del arte, los requisitos del software, los diagramas de casos de uso y una breve explicación del operador rotacional, usado frecuentemente a lo largo del proyecto.

3.1. ESTRUCTURAS DE DATOS CON LAS QUE SE TRABAJA

Los giros pueden ser identificados principalmente a partir de tres variables oceanográficas: la corriente, la temperatura y la altimetría. Aunque se trata de variables relacionadas, para este proyecto se decidió utilizar la corriente como variable de referencia por su mayor contenido informativo (módulo y dirección) y por permitir representaciones más claras y fáciles de interpretar.

El proyecto, por lo tanto, se basa en la utilización como datos de entrada de modelos de predicción oceanográficos, que proporcionan salidas para las corrientes oceánicas superficiales y sub-superficiales en un determinado espacio y tiempo. Estos modelos se usan en forma de una estructura que se denomina mapa de corrientes.

Los mapas de corrientes que se han utilizado en el proyecto son mapas predictivos de cuatro dimensiones: longitud, latitud, profundidad y tiempo. La salida numérica contiene una componente U longitudinal y una componente V latitudinal para cada punto del mapa, las cuales definen el sentido, dirección y magnitud de un vector de corriente para unas coordenadas de latitud y longitud determinadas a una cierta profundidad y en un instante de tiempo concreto.

Para este proyecto, tal y como se apuntaba en la introducción, los modelos de predicción globales no son adecuados. En las diferentes pruebas realizadas se han utilizado los siguientes modelos:

- **MyOcean:** este es un proyecto europeo en el que están implicadas numerosas instituciones. Para el presente trabajo se han usado los mapas correspondientes al dominio de Irlanda, el Golfo de Vizcaya y la Península Ibérica (IBI), que incluyen a las Islas Canarias dentro del mismo.
- **OurOcean:** proyecto americano que incluye diferentes modelos. Se han utilizado aquí los correspondientes al sur y el centro de California (SCOOS, CENCOOS).
- **Puertos del estado:** proyecto ESEOO para los dominios mediterráneo (ESEOMED) y canario (ESEOCAN).

En la figura 3.1.1 se muestra un ejemplo de mapa MyOcean-IBI de corrientes en superficie en torno a las islas canarias de La Gomera, Tenerife y Gran Canaria

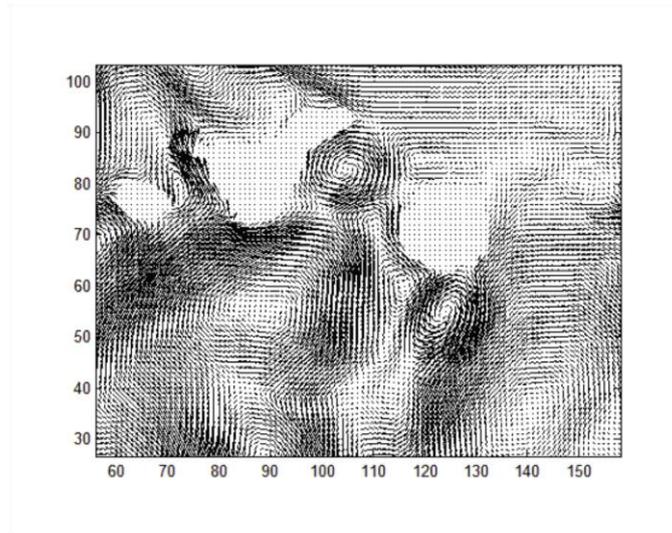


Figura 3.1.1

Gráfica que muestra los vectores de un mapa de predicción.

3.2. ESTADO DEL ARTE

A continuación se describen algunas herramientas relacionadas con la detección y caracterización de las estructuras oceánicas en general y de los giros en particular.

3.2.1. MÉTODO DE NENCIOLI

El método de Nencioli [Nencioli - 2010], es un método de detección y estimación de la forma de giros, desarrollado por Francesco Nencioli y su equipo de investigación del Instituto Mediterráneo de Oceanografía. Este método está basado únicamente en la geometría del campo vectorial. Esto quiere decir que no utiliza otras variables físicas como podría ser la temperatura del agua del mar.

El método de Nencioli se divide en dos fases: la primera trata de detectar la ubicación del centro de los giros en una determinada región, y la segunda intenta estimar su forma.

3.2.1.1. DETECCIÓN DE CENTROS DE GIRO

Para que un punto del mapa sea considerado un centro de giro debe cumplir 4 restricciones:

1. Longitudinalmente, la componente V a ambos lados del candidato a centro del giro (izquierda y derecha) debe tener signo opuesto y aumentar a medida que crece la distancia al centro del giro.
2. Latitudinalmente, la componente U a ambos lados del candidato a centro de giro (arriba y abajo) debe tener signo opuesto y aumentar a medida que crece la distancia al centro del giro.

3. Ha de haber un mínimo local de magnitud de corriente en el candidato a centro de giro.
4. Alrededor del candidato a centro de giro, las direcciones de los vectores de velocidad tienen que variar con un sentido constante de rotación.

Estas restricciones requieren la especificación de 2 parámetros. Uno para la primera, segunda y cuarta restricciones y otro para la tercera.

El primer parámetro, a , define cuántos puntos a lo largo de los ejes longitudinales y latitudinales hay que comprobar en la primera y segunda restricción.

El segundo parámetro, b , define la dimensión del área usada para hallar el mínimo local de velocidad. También define el área en la que los vectores coincidentes con sus límites serán comprobados para averiguar si se verifica la presencia de un sentido constante de rotación. En las figuras 3.2.1.1 y 3.2.1.2 se muestran ejemplos de la aplicación de las cuatro restricciones descritas.

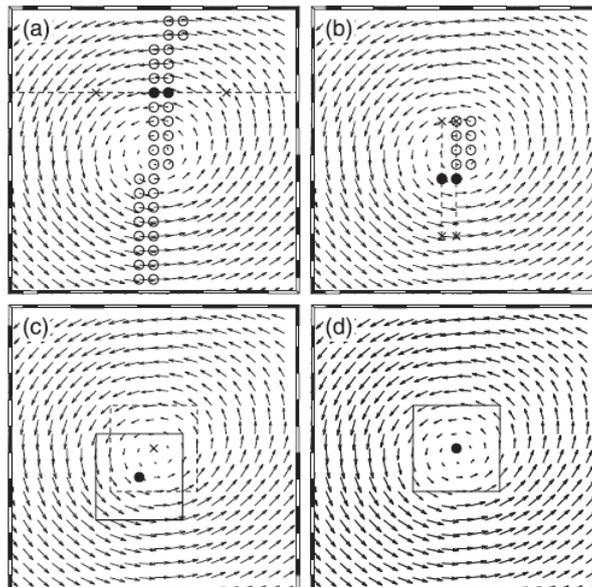


Figura 3.2.1.1

(a) Primera, (b) segunda y (c) tercera restricciones aplicadas a los vectores de esta región. Los parámetros elegidos son $a = 4$ y $b = 3$. La primera restricción se aplica a todas las secciones latitudinales (la que está representada por la línea de puntos se usa como ejemplo). La segunda y tercera restricción se aplica solamente a los puntos para los que la restricción previa ha sido satisfecha. El punto que satisfaga las cuatro restricciones indica la posición de un centro de giro. [Nencioli - 2010].



Figura 3.2.1.2

Aplicación de la cuarta restricción. Se ve como los ángulos coincidentes con el cuadrante dado por $b = 3$ (de lado $2*b + 1$). Tienen un sentido de rotación constante, por lo tanto el punto dado por la tercera restricción cumple la cuarta y se considera centro de giro. [Nencioli - 2010].

3.2.1.2. ESTIMACIÓN DE LA FORMA DEL GIRO

La estimación de la forma de un posible giro se basa en aplicar una función de flujo sobre una cierta área alrededor del centro de la estructura, a partir de las expresiones recogidas en las figuras 3.2.1.3 y 3.2.1.4:

Streamfunction Computation

Assuming $\psi(1, 1) = 0$, the streamfunction at a given point (i, j) is computed as

$$\psi(i, j) = \frac{(\psi_{xy} + \psi_{yx})}{2}, \quad (A1)$$

where

$$\psi_{xy} = -\sum_{x=1}^i v(x, 1)\Delta x + \sum_{y=1}^j u(i, y)\Delta y \quad \text{and} \quad (A2)$$

$$\psi_{yx} = -\sum_{x=1}^i v(x, j)\Delta x + \sum_{y=1}^j u(1, y)\Delta y. \quad (A3)$$

Figura 3.2.1.3

Aquí, u y v son las dos componentes de velocidad, y Δx y Δy son las diferencias longitudinales y latitudinales, respectivamente. Las sumas (A2) y (A3) son sumas trapezoidales, ambas formas discretizadas de la integral de la figura 3.2.1.4. [Nencioli - 2010].

$$\int_{(1,1)}^{(i,j)} \psi = \int_{(1,1)}^{(i,j)} (-vdx + udy).$$

Figura 3.2.1.4

Integral de las componentes u y v . [Nencioli - 2010].

La aplicación de estas ecuaciones da como resultado estimaciones del tipo que se muestra en la figura 3.2.1.5.

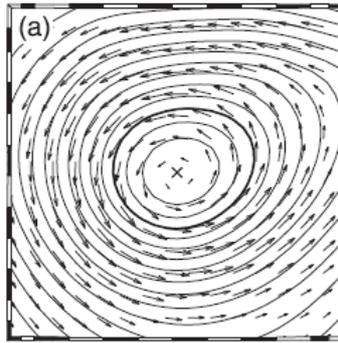


Figura 3.2.1.5

Ejemplo de una estimación de contorno obtenida por el método de Nencioli. [Nencioli - 2010].

3.2.2. GIROS EN LA MESOESCALA MEDIANTE OBSERVACIONES DE ALTIMETRÍA

A lo largo de un periodo de 16 años Dudley B. Chelton y Michael G. Schlax han estado analizando los giros de la mesoescala oceánica creando mapas de altimetría (o sea-surface height SSH) mezclando simultáneamente dos sistemas de teledetección y creando un procedimiento automático para identificar y seguir la trayectoria de giros.

Este método está basado, al contrario que el de Nencioli, en variables físicas como la temperatura y salinidad, con lo cual se puede englobar en otro grupo de métodos que no utilizan la geometría del campo vectorial. En la figura 3.2.2.1 se muestra un ejemplo de detección de giros mediante el uso de altimetría.

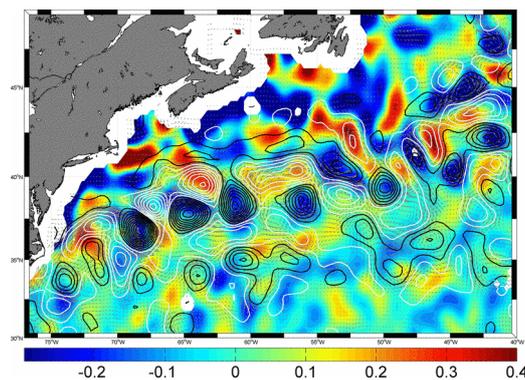


Figura 3.2.2.1

Detección de giros mediante el uso de la altimetría. En azul valores bajos de altimetría y en rojo valores altos. [<http://www.aviso.oceanobs.com/es/>].

Las medidas de altimetría se basan en la densidad del agua marina, variable que a su vez está relacionada con la cantidad de sales disueltas (salinidad) y su temperatura.

3.3. CARACTERIZACIÓN DEL GIRO

Un giro es una estructura física tridimensional que viene caracterizada por el tamaño y la forma de la estructura, así como la velocidad y dirección de las corrientes que contiene. Para este proyecto, se ha utilizado la discretización de la estructura del giro propuesta en [Hernández – 2013].

Un giro puede aproximarse, de forma simplificada, por una forma tronco cónica elipsoidal invertida caracterizada por los ejes mayores y menores en superficie y en la profundidad máxima de la estructura. A efectos de modelar la dinámica del giro, dicha estructura puede segmentarse verticalmente en una serie de discos que, a su vez, pueden dividirse radialmente en cilindros y angularmente en sectores. En la figura 3.3.1 se ilustra esta segmentación para un giro situado al suroeste de Gran Canaria resaltando dos de los volúmenes resultantes en dos profundidades distintas.

A cada uno de los volúmenes de agua resultantes se les puede asignar una velocidad de rotación dependiente de la velocidad promedio de la corriente en esa zona.

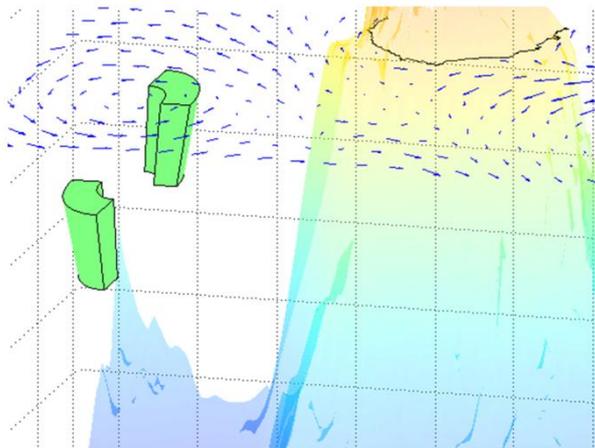


Figura 3.3.1

Representación de dos sectores resultantes de la segmentación de un giro al suroeste de Gran Canaria.

3.4. OPERADOR ROTACIONAL

En el cálculo vectorial, el rotacional (curl operator en inglés) es un operador que describe la rotación infinitesimal de un campo vectorial. Para cada punto del campo, su curvicidad o rotacional está representada por un vector. Los atributos de este vector (módulo, dirección y sentido) caracterizan la rotación en dicho punto.

La dirección del rotacional es el eje de rotación, determinado por la regla de la mano derecha, y la magnitud del rotacional es la magnitud de rotación. Si el campo vectorial representa el flujo de velocidad de un fluido en movimiento, entonces el rotacional es

la densidad de circulación del fluido. A un campo vectorial cuyo rotacional sea nulo se le llama irrotacional.

El operador rotacional por tanto, aplicado sobre un campo vectorial, genera una superficie en la que los valores más altos y más bajos, indican un mayor carácter rotacional del campo hacia un sentido o hacia otro.

Cuando se habla de carácter rotacional se quiere decir que en un determinado punto, comparado con el área circundante existen cambios en la dirección de los vectores del campo. Cuando estos cambios de dirección tienen sentido de las agujas del reloj (giros anticiclónicos), el rotacional genera valores negativos. Los valores positivos se generan en caso contrario (giros ciclónicos). Las figuras 3.4.1 y 3.4.2 muestran un mapa de corrientes y su correspondiente superficie rotacional generada.

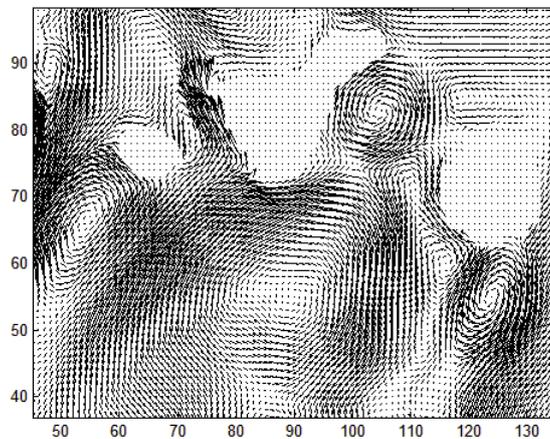


Figura 3.4.1

Gráfica que muestra los vectores obtenidos de un mapa de predicción de corrientes.

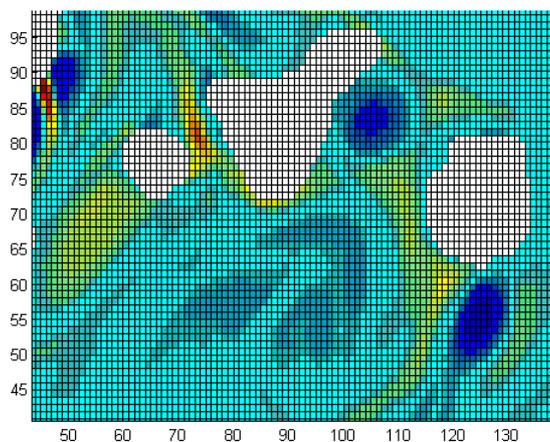


Figura 3.4.2

Resultado de aplicar el operador rotacional sobre el mapa de corrientes de la figura 3.4.1.

3.5. REQUISITOS DEL SOFTWARE

En este apartado se detalla el análisis final realizado sobre todas las necesidades y requisitos que finalmente se han desarrollado en este proyecto. Los requisitos estaban definidos de una forma general en un principio y se trabajó sobre ellos concretándolos y añadiendo algunos más a lo largo del proceso de desarrollo, ya que inicialmente no se conocían ni las limitaciones ni la dificultad de la creación de un sistema de estas características, y tampoco se podía prever la eficacia de los resultados obtenidos y la posibilidad de adición de funcionalidades extra. En esta sección se exponen dichos requisitos en su forma final divididos en dos partes: requisitos funcionales y no funcionales.

3.5.1. REQUISITOS FUNCIONALES

Los requisitos funcionales son aquellos que describen cómo será el funcionamiento del sistema, es decir, cómo reaccionará el sistema ante una determinada entrada:

- El sistema debe permitir la visualización del mapa de predicción en cada instante de tiempo y en cada nivel de profundidad.
- El sistema debe permitir al usuario señalar la ubicación de los giros y marcar su forma y tamaño.
- El sistema debe permitir dividir el giro previamente marcado en secciones tanto angulares como radiales.
- El sistema debe permitir asignar velocidades a cada división del giro.
- El sistema debe permitir cambiar de giro actual para modificar sus parámetros
- El sistema debe permitir guardar la información generada para ser usada más adelante.
- El sistema debe tener un sistema automático de detección y estimación de la forma de los giros.
- El sistema debe contar con un método de comparación objetivo entre los giros caracterizados por el usuario y los caracterizados por el sistema automático.
- El sistema debe permitir visualizar el ciclo de vida de los giros.

3.5.2. REQUISITOS NO FUNCIONALES

Los requisitos no funcionales son restricciones o preferencias de los servicios o funcionalidades ofrecidos por el sistema, como eficiencia, fiabilidad, usabilidad, etc.

- La caracterización manual de giros debe poder hacerse de forma intuitiva para el usuario.
- La caracterización automática ha de ejecutarse con tiempos aceptables por debajo de los 5 segundos por mapa.

- Se deben generar unas estructuras de datos que definan a los giros fácilmente y que sean entendibles y usables.
- El sistema debe ser escalable.

3.6. CASOS DE USO

En este apartado se describen las funcionalidades con las que cuenta el sistema de una manera más detallada, es decir, se profundiza en el análisis de los requisitos funcionales mostrados en el apartado anterior. Se va a usar la notación de los diagramas de casos de uso, por lo tanto, se muestran los casos de uso con sus relaciones y actores implicados.

Los casos de uso que se presentan a continuación se han dividido para una mejor comprensión de los mismos.

3.6.1 UBICAR Y DAR FORMA AL GIRO

En la figura 3.6.1 se muestran los casos de uso relacionados con las acciones de ubicar y dar forma al giro.

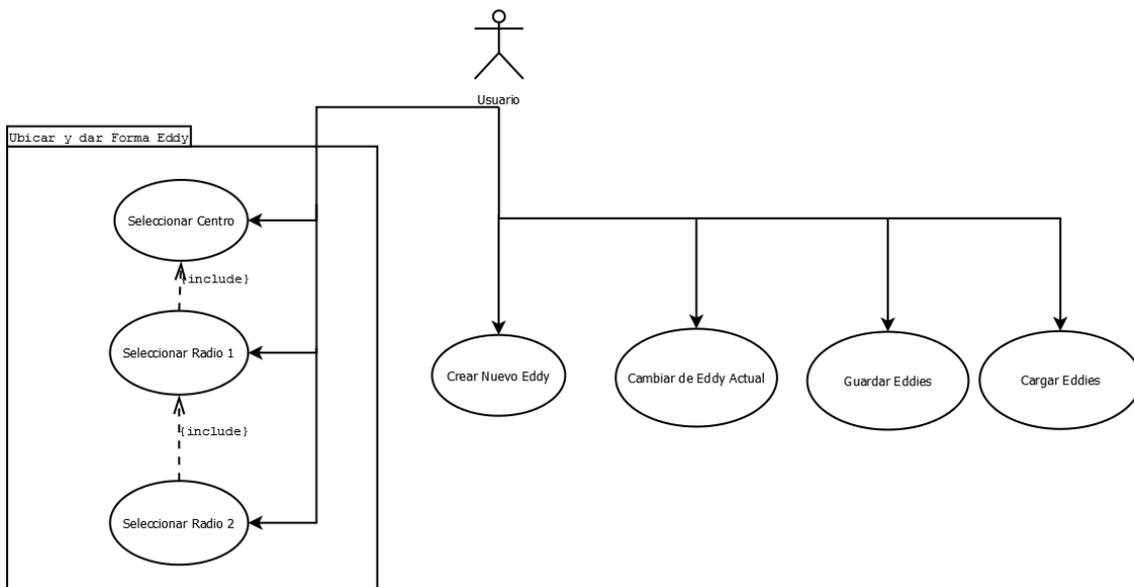


Figura 3.6.1

Casos de uso de las acciones de ubicar y dar forma al giro

El usuario desde el punto de vista de un giro, puede seleccionar su centro y sus radios, pero solo podrá seleccionar el radio 1 (ubicado en el primer cuadrante), si ha seleccionado previamente su centro y solo podrá seleccionar el radio 2 (ubicado en el segundo cuadrante), si ha seleccionado previamente el radio 1. A este proceso se le llama **ubicar y dar forma al giro**.

También podrá crear un nuevo giro, cambiar de giro actual y por lo tanto cambiar sus parámetros como desee, guardar y cargar giros previamente guardados.

3.6.2 VISUALIZACIÓN DE LOS MAPAS

En la figura 3.6.2 se muestran las acciones que puede realizar el usuario sobre un mapa de corrientes en el contexto de su visualización.

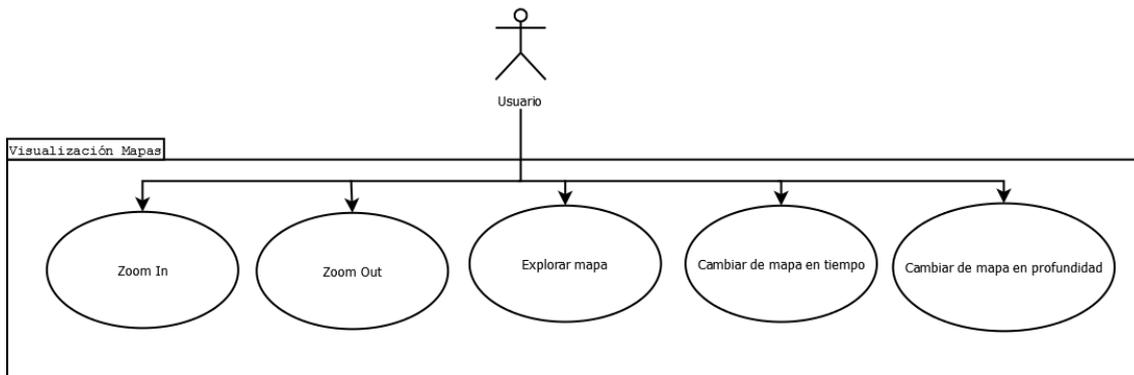


Figura 3.6.2

Casos de uso de las acciones de visualización de los mapas de corrientes.

El usuario podrá, dado un mapa, ampliarlo (zoom in), o reducirlo (zoom out) y moverse por el mismo. También dispondrá la posibilidad de cambiar el instante de tiempo de visualización del mapa y la capa de profundidad.

3.6.3 DIVIDIR EL GIRO EN SECCIONES

En la figura 3.6.3 se muestran los casos de uso relacionados con la división del giro en secciones.

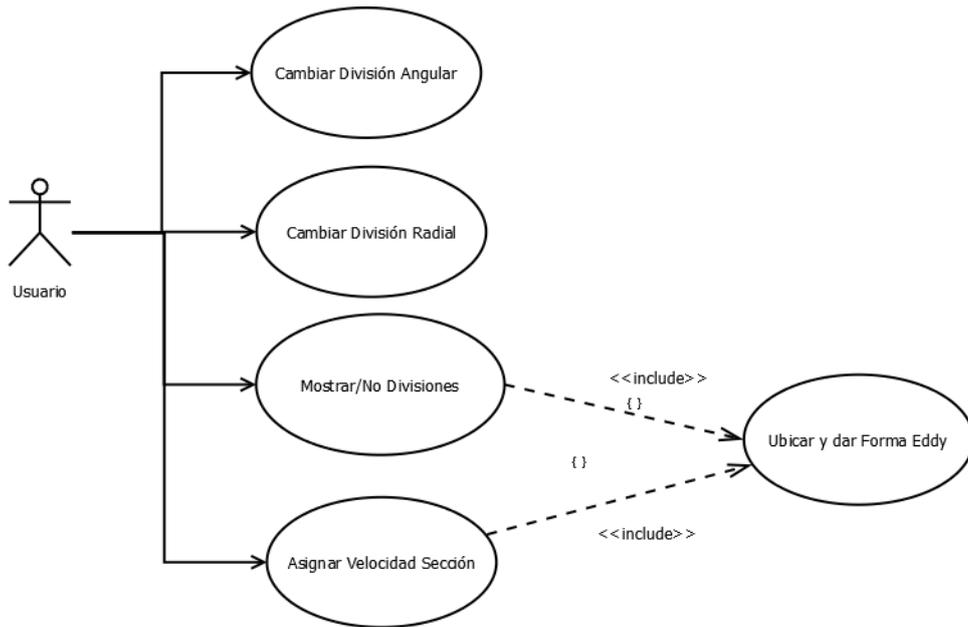


Figura 3.6.3

Casos de uso relacionados con las secciones en las que un giro puede ser dividido.

El usuario podrá cambiar las divisiones de un giro tanto angularmente como radialmente y elegir ver dichas divisiones o por el contrario ver los radios previamente establecidos. También podrá asignar una velocidad de corriente a cada sección del giro.

3.6.4 APLICAR ALGORITMOS AL MAPA DE CORRIENTES

En la figura 3.6.4 se muestran los casos de uso relacionados con los algoritmos que pueden ser aplicados al mapa de corrientes.

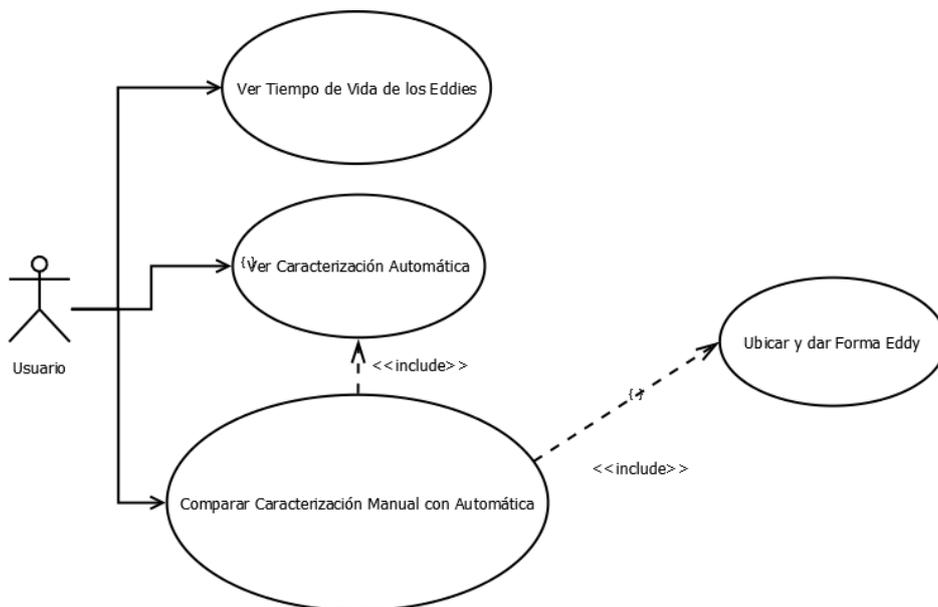


Figura 3.6.4

Algoritmos que pueden ser aplicados a los mapas de corrientes.

El usuario tendrá la posibilidad de visualizar el tiempo de vida de los giros a partir del instante de tiempo seleccionado o ver la detección y caracterización automática en dicho instante. Por último se podrá ver la comparación entre la detección manual y la automática que requiere previamente haber caracterizado manualmente al menos un giro.

3.6.5 PROFUNDIDAD DE LOS GIROS

En la figura 3.6.5 se muestran las acciones que puede realizar el usuario en el contexto de estimar la forma del giro a distintas profundidades. Para ello habrá que, al menos, ubicar y dar forma al giro como mínimo a dos profundidades para interpolarlas y estimar los límites de las secciones intermedias.

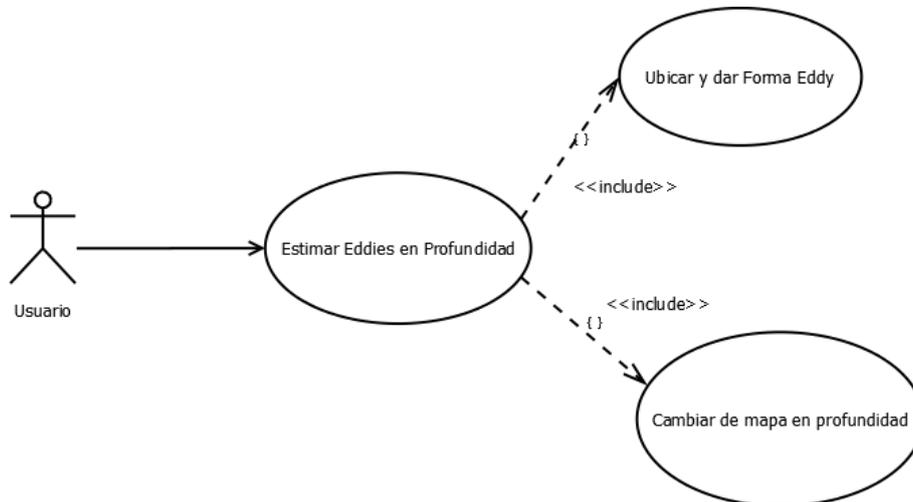


Figura 3.6.5

Casos de uso relacionados con la estimación de la forma en 3 dimensiones del giro.

4. DISEÑO

En este apartado se muestra el diseño de la aplicación presentando la arquitectura escogida, explicando la interfaz gráfica de usuario por la que se ha optado e ilustrando el proceso temporal de diseño de prototipos que se fue dando durante la realización del proyecto. Se pondrá especial énfasis en la descripción de los métodos de caracterización automática. Por último, se resume el diseño del sistema en su forma final.

4.1. DISEÑO DE LA ARQUITECTURA

El software desarrollado en este proyecto puede seguir un modelo arquitectónico simple, ya que se trata de una aplicación que no hace uso de internet, ni tiene relaciones con bases de datos. Un posible diseño es una arquitectura que se basa en un cliente accediendo mediante una interfaz gráfica de usuario a los distintos módulos funcionales que se dedican a cada tarea (ver figura 4.1.1).

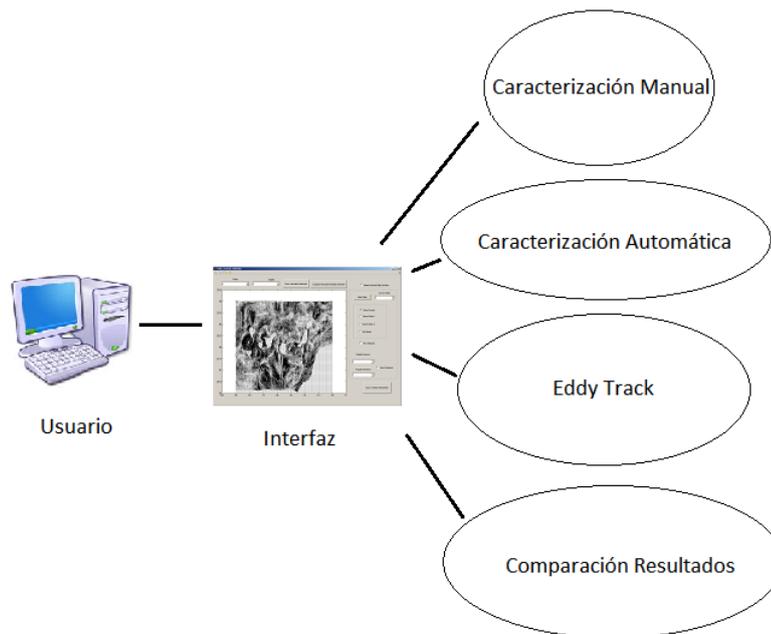


Figura 4.1.1

Arquitectura utilizada en el proyecto. El usuario accede a los diferentes módulos a través de una interfaz.

4.2. PROCESO EVOLUTIVO DE DISEÑO

Para que el sistema alcanzara su estado final fue necesario aplicar un proceso de diseño evolutivo, cuyos prototipos generados eran probados y comparados con otros métodos de caracterización de giros (en el caso de la caracterización automática) para comprobar su calidad.

Por otro lado también se realizaron una serie de diseños y pruebas diferentes a lo que fue el método final para conseguir el resultado deseado, los cuales fueron descartados en sus fases iniciales por diferentes razones. En este apartado se describen tanto estos diseños experimentales como el proceso definitivo que llevó a la consecución del sistema en su forma final. Hay que tener en cuenta que se emplea una presentación diferencial, de manera que para cada nuevo prototipo se resaltan únicamente los aspectos realmente novedosos con respecto a los anteriores.

Este apartado hace referencia únicamente al diseño del sistema de detección automática de giros. El desarrollo de los otros apartados de marcado manual, comparativa y seguidor de giros fue mucho más directo, por lo que se presentarán directamente en la sección 4.3.

El lector que no esté interesado en seguir todo el proceso de prototipado, puede proseguir la lectura en el apartado 4.3, donde se describe el sistema en su versión final.

4.2.1. PROTOTIPO BASADO EN REDES NEURONALES

La idea de utilizar un sistema basado en redes neuronales surgió inicialmente al comprender que los giros contaban con una serie de patrones posibles que podrían ser asimilados por el sistema tras un proceso de aprendizaje. Los giros, desde la perspectiva de la corriente del océano modelada mediante vectores, son el centro rotacional a partir del cual la dirección y sentido de los vectores de corriente va rotando, produciéndose un vórtice alrededor del centro de la estructura (ver figura 4.2.1.1).

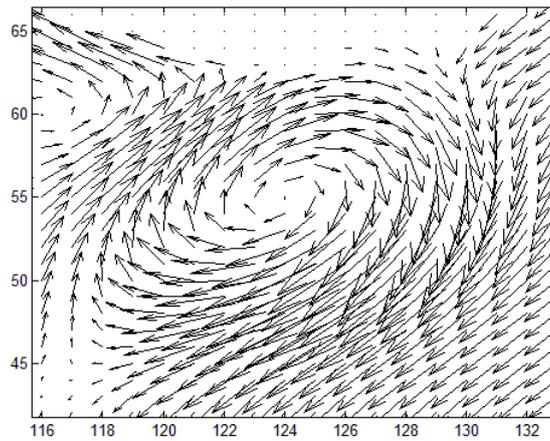


Figura 4.2.1.1

Región de un mapa de corrientes donde se aprecia la existencia de un giro.

La red neuronal que se pensó en utilizar en la investigación de esta forma para alcanzar el objetivo del software fue una red backpropagation (ver figura 4.2.1.2).

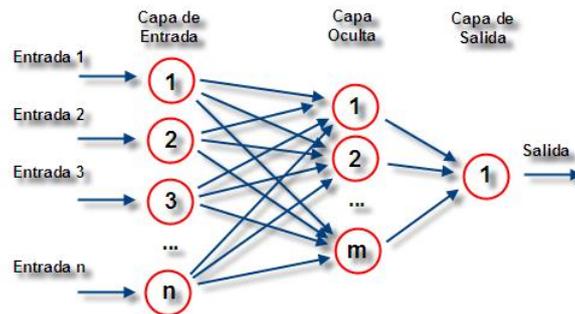


Figura 4.2.1.2

Esquema general de una red neuronal artificial backpropagation

La propagación hacia atrás de errores o retropropagación es un algoritmo de aprendizaje supervisado que se usa para entrenar redes neuronales artificiales. El algoritmo emplea un ciclo propagación – adaptación de dos fases.

Una vez que se ha aplicado un patrón a la entrada de la red como estímulo, éste se propaga desde la primera capa a través de las capas superiores de la red, hasta generar una salida. Las señales de salida ante diferentes patrones de entrada se comparan con la salida deseada y se calcula una señal de error para cada de ellas. Las señales de error se propagan hacia atrás, partiendo de la última capa, hacia todas las neuronas de la capa oculta que contribuyen directamente a la salida. Sin embargo, las neuronas de la capa oculta sólo reciben una fracción de la señal total del error, basándose aproximadamente en la contribución relativa que haya aportado cada neurona a la salida original. Este proceso se repite, capa por capa, hasta que todas las

neuronas de la red hayan recibido una señal de error que describa su contribución relativa al error total. La importancia de este proceso consiste en que, a medida que se entrena la red, las neuronas de las capas intermedias se organizan a sí mismas de tal modo que las distintas neuronas aprenden a reconocer distintas características del espacio total de entrada. Después del entrenamiento, cuando se les presente un patrón arbitrario de entrada que contenga ruido o que esté incompleto, las neuronas de la capa oculta de la red responderán con una salida activa si la nueva entrada contiene un patrón que se asemeje a aquella característica que las neuronas individuales hayan aprendido a reconocer durante su entrenamiento.

Dicho esto, la idea del prototipo consistía en pasar como entrada la dirección, sentido y magnitud en cada punto del mapa, es decir, el campo vectorial de la zona objetivo para detectar giros; por lo tanto se necesitarían tantas neuronas de entrada como puntos en los que hay un valor de corriente. Al contar con componentes U y V, el número de neuronas debía duplicarse también.

El número de neuronas de salida sería la mitad del de neuronas de entrada, ya que lo que se esperaba tras el proceso de aprendizaje es que las neuronas de salida correspondientes a las zonas del mapa donde hay un giro tuvieran valores altos, y valores bajos en las correspondientes a las zonas en los que no hay un giro. En la figura 4.2.1.3 se muestra un ejemplo de salida esperada.

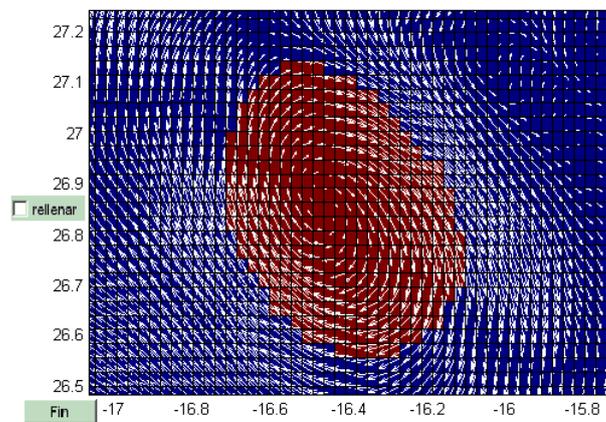


Figura 4.2.1.3

Salida esperada al pasar a la red backpropagation un mapa de corrientes.

Para que esta idea fuera posible se necesitaba tener un alto número de muestras de entrenamiento y de validación. Es decir campos vectoriales de muchos mapas diferentes en instantes de tiempo diferentes, con su correspondiente resultado esperado para conseguir que la red generalizara obteniendo un resultado aceptable.

Por lo tanto se necesitaba una manera con la que obtener los resultados esperados correspondientes a los conjuntos de entrenamiento y validación, es decir, una herramienta para marcar las zonas en las que hay un giro. Para ello se desarrolló una

sencilla aplicación que permitía marcar los giros superficiales y guardar dicha información para posteriormente ser utilizada por la red neuronal backpropagation.

4.2.1.1. RAZONES PARA DESESTIMAR ESTE MÉTODO

Hay dos principales razones para haber desestimado esta forma de conseguir la detección automática de giros. La primera razón es que para conseguir entrenar la red de tal modo que pudiera conseguir un resultado adecuado para múltiples mapas con distintos tamaños siendo capaz de generalizar, se necesitaba demasiado trabajo humano en la construcción de los conjuntos de entrenamiento y validación, aún contando con la aplicación de marcado descrita anteriormente.

La segunda razón es la lentitud del entrenamiento de una red de tales dimensiones, ya que, como se ha indicado antes, para conseguir un resultado adecuado se necesitan conjuntos muy grandes, los cuales causaron una convergencia de la red demasiado lenta.

4.2.2. PROCESO DE DISEÑO DE LA DETECCIÓN DE CENTROS DE GIROS

Para detectar la ubicación de los centros de los giros a partir del mapa de predicción de corrientes oceánicas, se ha utilizado el operador rotacional descrito en el capítulo de análisis.

Éste y otros procesos de prototipado se describirán dividiendo el proceso en iteraciones.

4.2.2.1. PRIMERA ITERACIÓN: CIRCULACIÓN ALREDEDOR DE UN MÁXIMO/MÍNIMO DEL ROTACIONAL

Inicialmente se asumió que todos los centros de los giros coincidían en ubicación con los máximos y mínimos del rotacional, sin embargo no todos los máximos y mínimos del rotacional indicaban la existencia de un giro, como se muestra en las figuras 4.2.2.1 y 4.2.2.2.

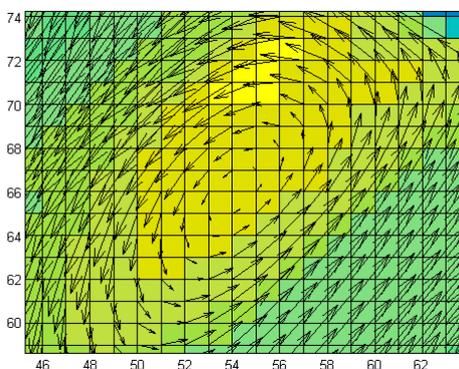


Figura 4.2.2.1

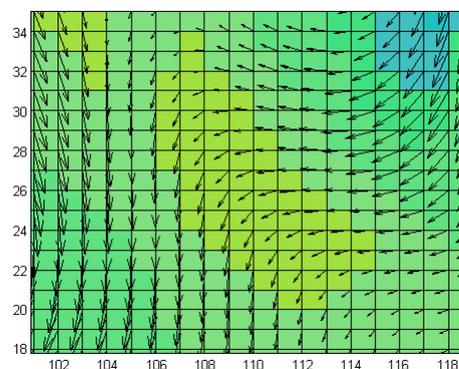


Figura 4.2.2.2

Ejemplos donde el máximo local coincide con un giro (izquierda) y donde no es así (derecha).

A partir de esta idea se empezaron a diseñar tests que separaran los máximos y mínimos locales que coincidían con giros, de los que no.

El primer test que se diseñó fue uno basado en una de las restricciones del método de Nencioli (descrito en el apartado de análisis). Se trata de utilizar los ángulos de los vectores alrededor de los candidatos a ser centros de giros. Para que en un punto del mapa haya un centro de giro se debe cumplir que los ángulos de los vectores alrededor de éste tengan un sentido de rotación uniforme.

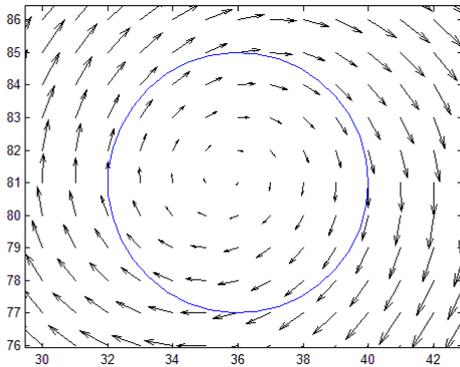


Figura 4.2.2.3

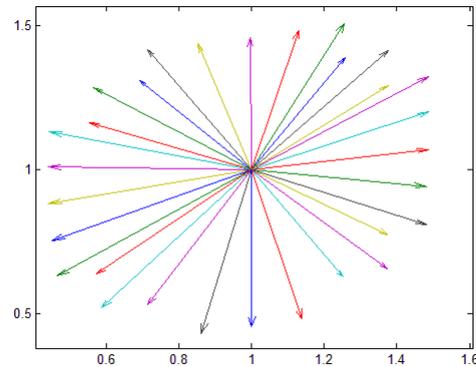


Figura 4.2.2.4

Elipse de referencia (izquierda) y vectores del mapa más cercanos (derecha).

Para que el test siguiera su curso se debía cumplir que en sentido horario el ángulo del vector que se está comprobando no excediera en un determinado valor al ángulo del vector anterior, y que no fuera nunca inferior al mismo (ver figuras 4.2.2.3 y 4.2.2.4). Si el test se cumplía se consideraba un centro de giro, en caso contrario no. Experimentalmente se determinó que un valor de 30° ofrecía, en principio, buenos resultados en la zona de estudio.

A partir de aquí surge la duda de cómo definir qué vectores son los que se han de utilizar en el test descrito. Lo ideal hubiera sido aplicar el test sobre los vectores que coincidieran con el límite que define la forma del giro como en la imagen anterior; sin embargo, como es lógico, no se puede saber la forma del giro en este punto, porque ni siquiera ha sido detectado su centro. Por lo tanto, obligatoriamente había que usar un límite sintético que aproximara el posible borde del giro.

Inicialmente se pensó en usar un límite circular alrededor del candidato a centro del giro, pero se descartó debido a la mayor complejidad del círculo respecto a otras formas. Por otra parte, los giros no tienen por qué ser circulares, ya que sus formas poseen muchos más grados de libertad, tal y como muestran los ejemplos de la figura 4.2.2.5.

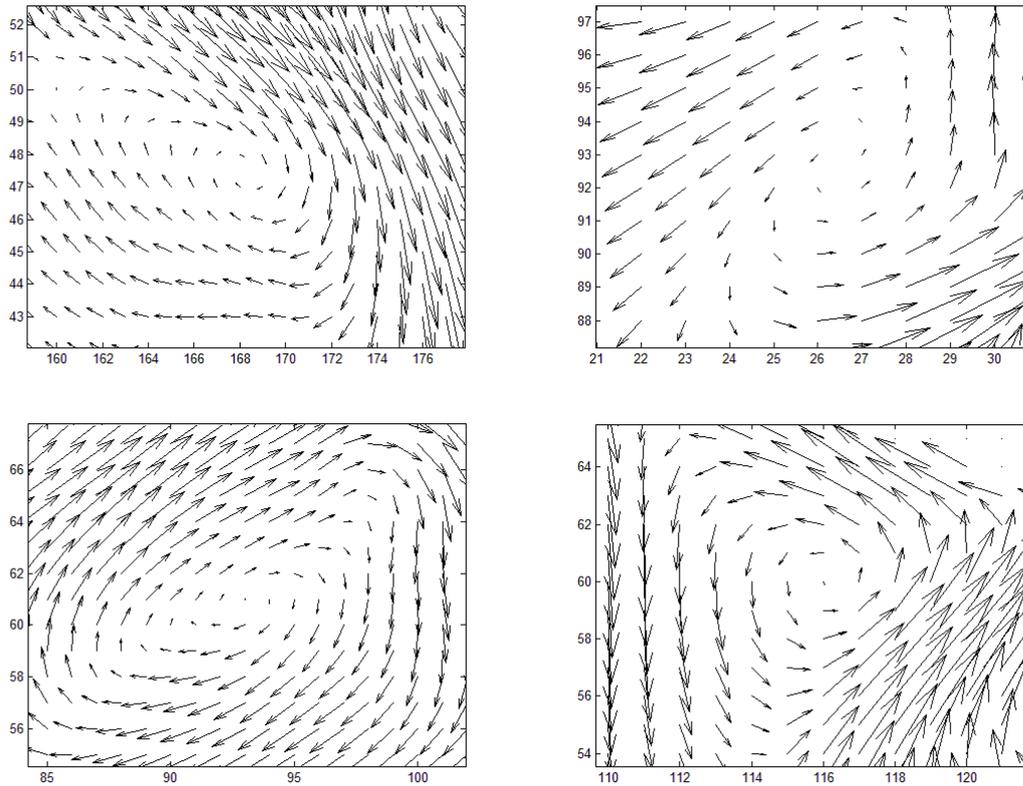


Figura 4.2.2.5

Ejemplos de giros con forma no elipsoidal

Finalmente se optó por utilizar un cuadrado alrededor del candidato al centro del giro, ya que es una forma más sencilla que el círculo y por lo tanto ahorra tiempo de ejecución, a la vez que eran asumibles los fallos que pudiera producir su utilización (ver figura 4.2.2.6).

En principio las dimensiones del cuadrado límite se dejaron como parámetro, intuyendo que lo que mejor solía funcionar eran cuadrados de 7x7 o 9x9 celdas. Más adelante, en el capítulo de pruebas, se profundiza en esta cuestión.

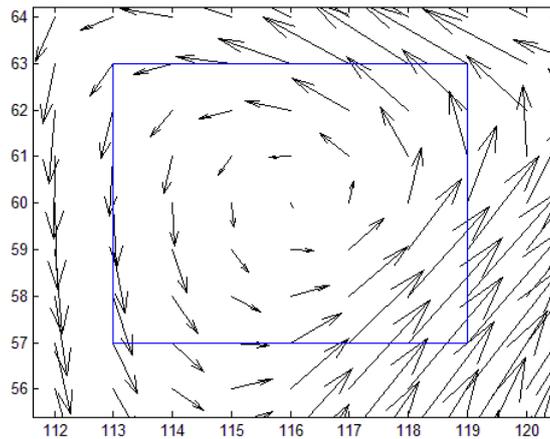


Figura 4.2.2.6

Ejemplo de un cuadrado límite de 7x7 celdas alrededor de un candidato a centro de giro.

4.2.2.2. SEGUNDA ITERACIÓN: MÍNIMOS DE CORRIENTE

Al ir comparando las superficies generadas por el operador rotacional con los campos vectoriales de los mapas predictivos, se fue viendo que los máximos y mínimos del rotacional no tenían por qué coincidir exactamente con los centros de los giros, aún en el caso de que el test descrito anteriormente se cumpliera. Esto es debido a que los vectores que rodean a los centros de los giros pueden no tener una magnitud de corriente simétrica con el centro, y por lo tanto la zona de valores bajos/altos que por su propia naturaleza genera el operador rotacional, se desplaza hacia la zona con magnitudes de corriente más elevadas. En las figuras 4.2.2.7 y 4.2.2.8 se muestran dos ejemplos que comparan unos valores bajos coincidentes con un giro con unos valores desplazados.

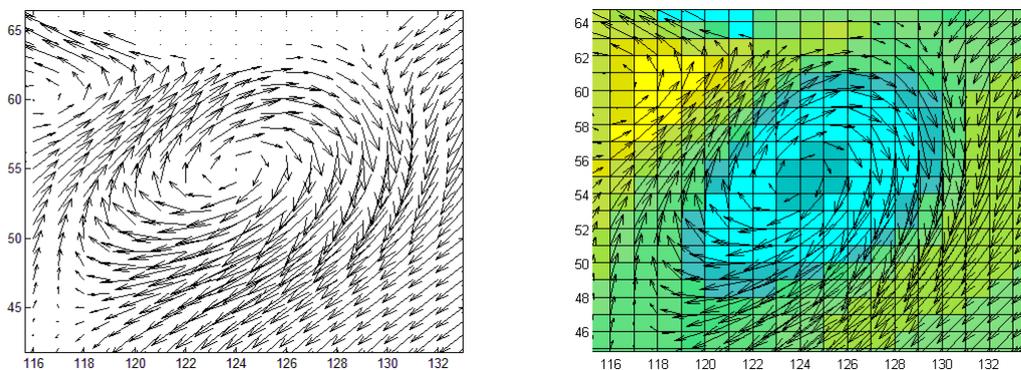


Figura 4.2.2.7

Ejemplo de mínimo local del rotacional que coincide con el centro del giro.

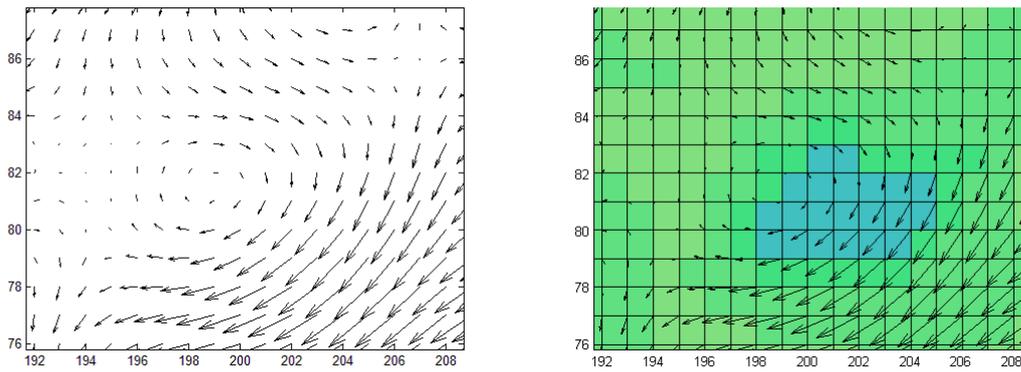
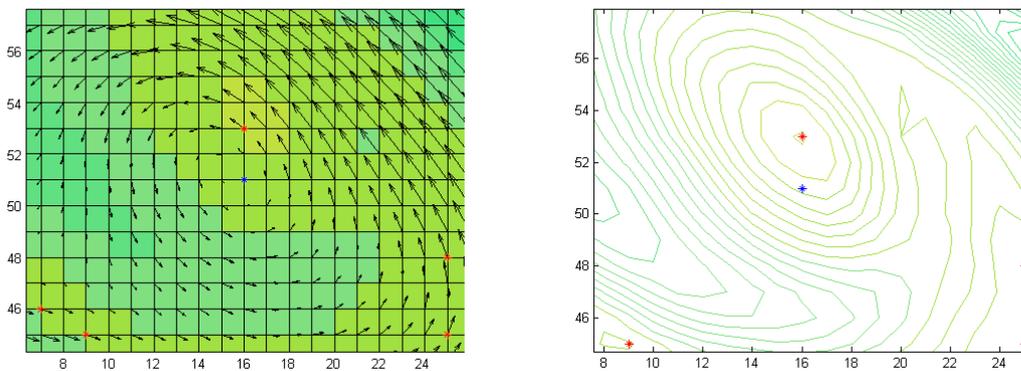


Figura 4.2.2.8

Ejemplo de mínimo local del rotacional desplazado hacia la zona con una magnitud de corriente superior.

Por lo tanto, y aunque los extremos locales del rotacional dan una pista incuestionable sobre la ubicación de los centros de los giros, se hizo necesario complementarlo con la búsqueda de los mínimos locales de corriente en esas regiones. Lo primero que se pensó fue en definir un área de unas ciertas dimensiones alrededor del máximo o mínimo local del rotacional y buscar el punto con el vector de corriente de menor magnitud, tal y como se muestra en la figura 4.2.2.9. Este punto se consideraría candidato a ser centro de giro, y a partir de él, se ejecutaría el test que comprobaría si realmente se trata de un centro de giro o no.



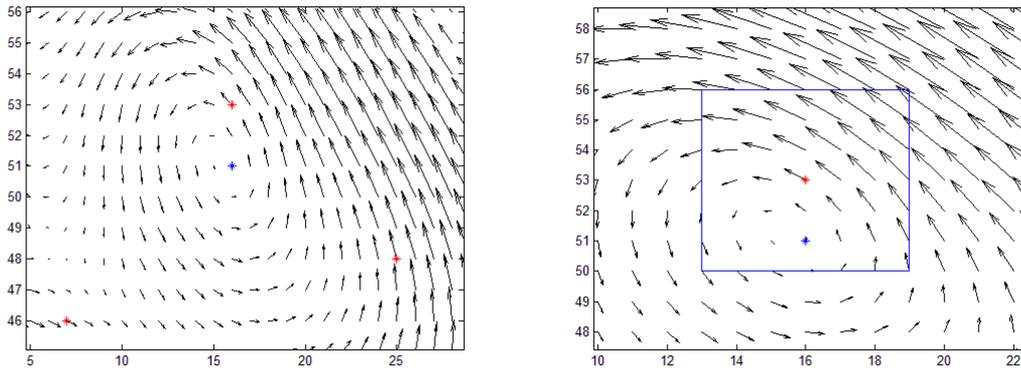
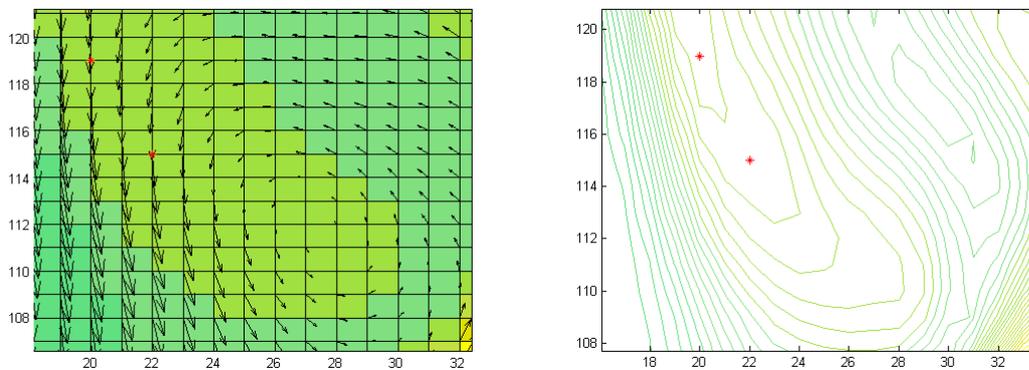


Figura 4.2.2.9

Ejemplo de área alrededor del max/min del rotacional (asterisco rojo) en la que se busca un mínimo de magnitud de corriente (asterisco azul).

El problema de esta forma de hallar los puntos en los que localmente la magnitud de corriente es mínima es saber el tamaño del área sobre la que hacer la búsqueda. Si se elige un área muy pequeña puede no encontrarse el centro real del giro (en caso de que efectivamente lo sea), y si se elige un área muy grande puede que se encuentre el centro de otro giro o simplemente un punto donde la magnitud de corriente sea muy baja. En ambos casos el resultado es erróneo, como se puede apreciar en las figuras 4.2.2.10 y 4.2.2.11.



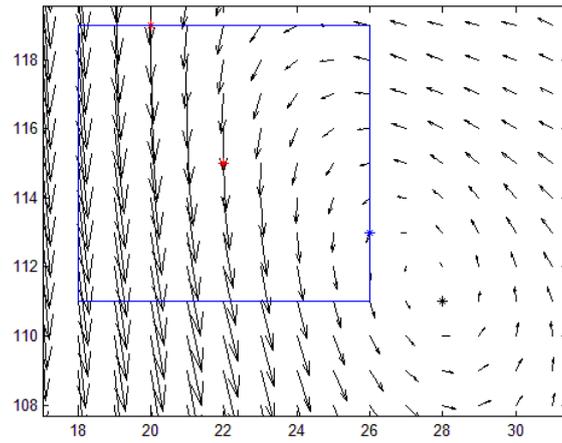


Figura 4.2.2.10

En rojo, un max/min del rotacional y en azul el mínimo de corriente detectado sobre un área de búsqueda insuficiente, por lo que no coincide con el centro del giro (en negro).

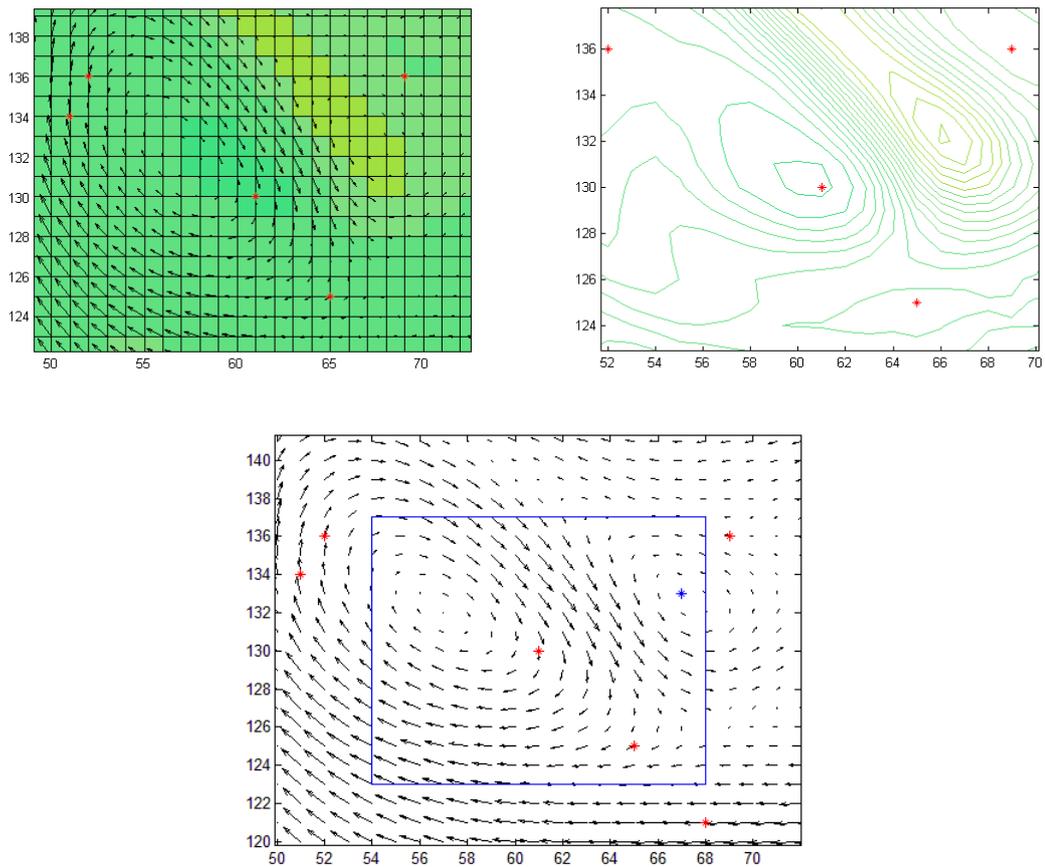


Figura 4.2.2.11

Al elegir un área demasiado grande se detecta como mínimo de corriente un punto que no corresponde con el tipo de giro que se presupone cercano a un mínimo del rotacional, y por lo tanto se descartaría como candidato a centro de giro.

4.2.2.3. TERCERA ITERACIÓN: DISTINTOS LÍMITES PARA TESTEAR VECTORES

Como se indicó anteriormente, el tamaño del cuadrado límite que era necesario definir para aplicar el test sobre los candidatos a centros de giros era dejado como parámetro, ya que resulta difícil saber cuáles serían sus dimensiones óptimas.

Al establecer un tamaño fijo había muchas posibilidades de que, eligiendo un cuadrado límite determinado, se descartaran algunos candidatos que, eligiendo otros tamaños, sí que eran considerados giros; sin embargo, al cambiar el tamaño surgían otros fallos de detección. Por ejemplo, en la figura 4.2.2.12, para un área de 7x7 se descarta el candidato como centro de giro, ya que al detectar los ángulos adyacentes de 6.7401° y 36.9683° la diferencia es mayor que el límite establecido (30°), aunque visualmente se puede ver que se trata de un giro. En cambio, con tamaño 9x9 el candidato es aceptado, tal y como se muestra en la figura 4.2.2.13.

El problema es que el establecimiento de las áreas de verificación depende de la relación que exista entre el tamaño de las estructuras y la resolución espacial del mapa que se esté usando. Esta relación podría determinarse empíricamente como un valor promedio para las diferentes regiones del océano en las que se fuera a aplicar la detección de giros, pero ello restaría generalidad al método.

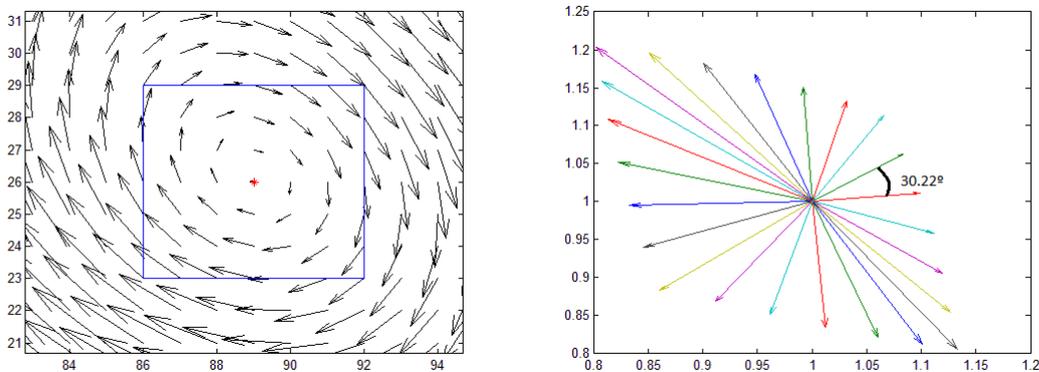


Figura 4.2.2.12

Ejemplo de candidato descartado sobre un área de 7x7.

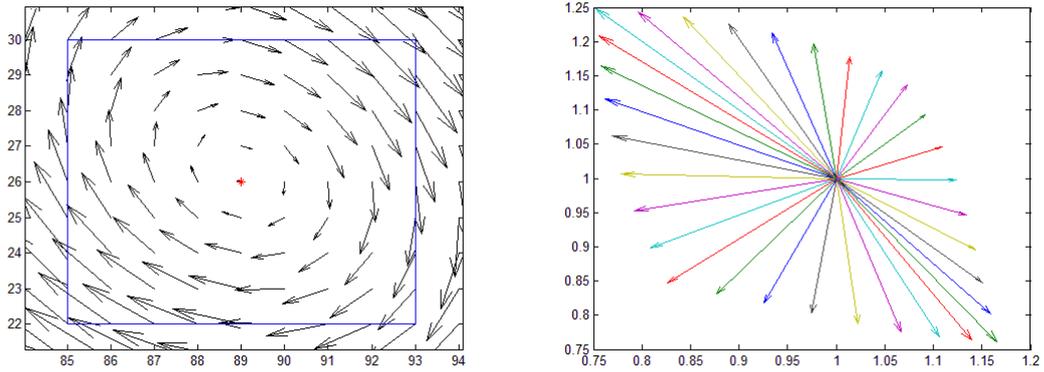


Figura 4.2.2.13

Ejemplo de candidato aceptado sobre un área de 9x9.

La solución que se estableció para esta eventualidad fue, ir aumentando progresivamente el tamaño del cuadrado límite para cada giro, aplicando el test sobre cada uno de ellos hasta que éste se cumpliera o se alcanzara un tope establecido previamente para el tamaño del cuadrado límite. De esta forma se consiguió mejorar el resultado sensiblemente, a costa de un incremento de complejidad asumible. Un ejemplo de este proceso se ilustra en las figuras 4.2.2.14, 4.2.2.15 y 4.2.2.16.

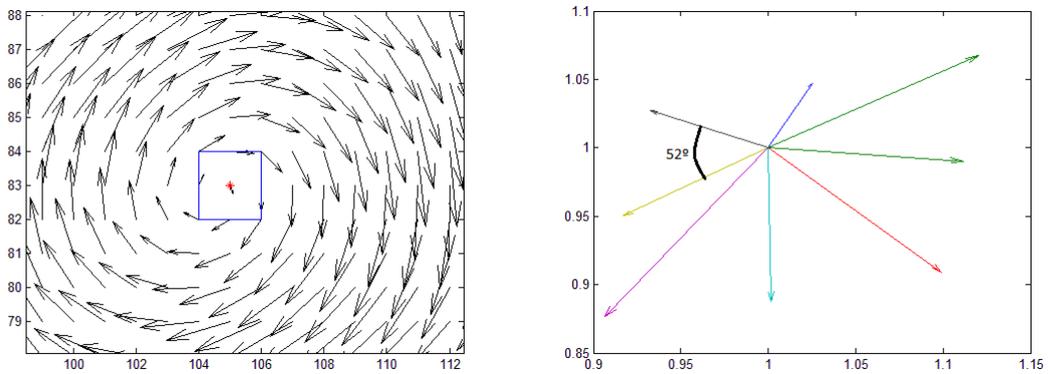


Figura 4.2.2.14

Área de 3x3. El proceso falla porque aparecen dos vectores adyacentes con ángulos 158.1986° y 210.8721° cuya diferencia es mayor a los 30° que se establecieron como límite.

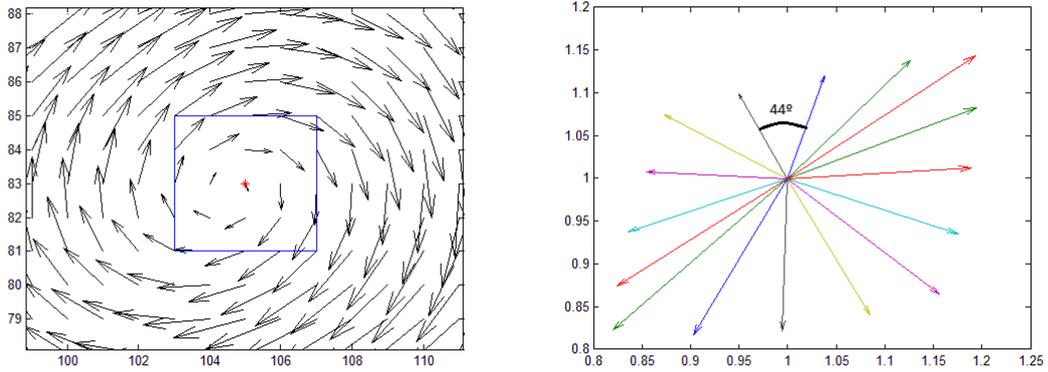


Figura 4.2.2.15

Área de 5x5. El proceso falla porque aparecen dos vectores adyacentes con ángulos 72.4744° y 116.9802° cuya diferencia es mayor a los 30° que se establecieron como límite.

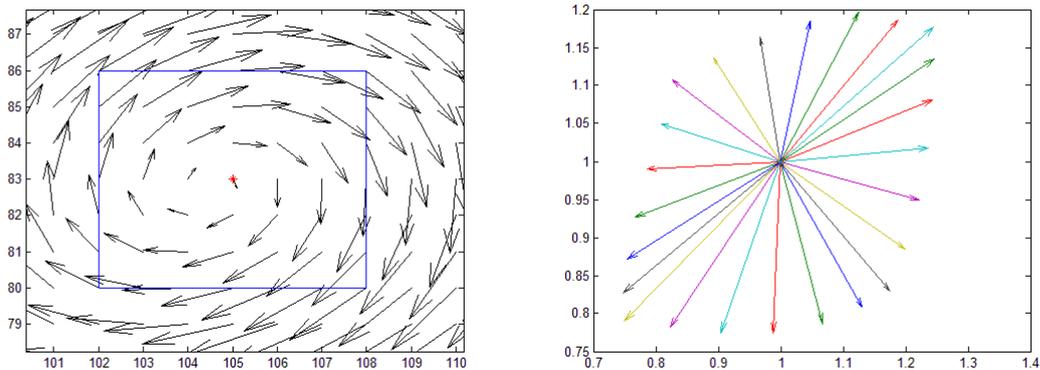


Figura 4.2.2.16

Área de 7x7. El candidato a centro de giro cumple con el test ya que todos los ángulos adyacentes tienen una diferencia menor a 30° . El proceso se detiene y se acepta como centro de giro.

4.2.2.4. CUARTA ITERACIÓN: AUMENTO DE LA DIFERENCIA ANGULAR ACEPTADA

Tras múltiples pruebas se fue viendo que la diferencia angular máxima entre dos vectores adyacentes, establecida inicialmente para decidir si en un mínimo local de magnitud de corriente había un centro de giro (30°), era demasiado restrictiva (ver figura 4.2.2.17 y tabla 4.2.2.1).

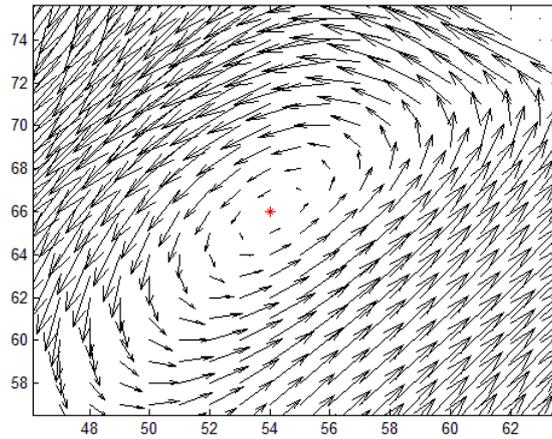


Figura 4.2.2.17

Ejemplo de un giro visualmente reconocible, rechazado al usar un límite para la diferencia angular de 30°.

Tamaño de Área	Diferencia angular inválida (grados)
3x3	106.3632
5x5	67.9275
7x7	44.9797
9x9	32.3193
11x11	38.9791
13x13	64.5779

Tabla 4.2.2.1

Diferencias angulares que han hecho parar el test para los distintos tamaños de área.

Por lo tanto, y tras un primer aumento de dicha diferencia angular a 45°, finalmente se estableció en 72° a partir de las pruebas realizadas (que se exponen en el capítulo de pruebas). Este aumento tan significativo conllevó, como es lógico, una serie de problemas de sobredetección.

4.2.2.5. QUINTA ITERACIÓN: SOLUCIÓN A LA SOBREDETECCIÓN

Tras múltiples pruebas del método en la forma explicada hasta ahora, se fue observando que se podía producir una sobredetección de centros de giros en un tipo concreto de estructuras. Estas estructuras oceánicas tienen una naturaleza transitoria, es decir, se producen cuando un giro se está formando, o cuando está desapareciendo. En la figura 4.2.2.18 se presentan algunos ejemplos ilustrativos.

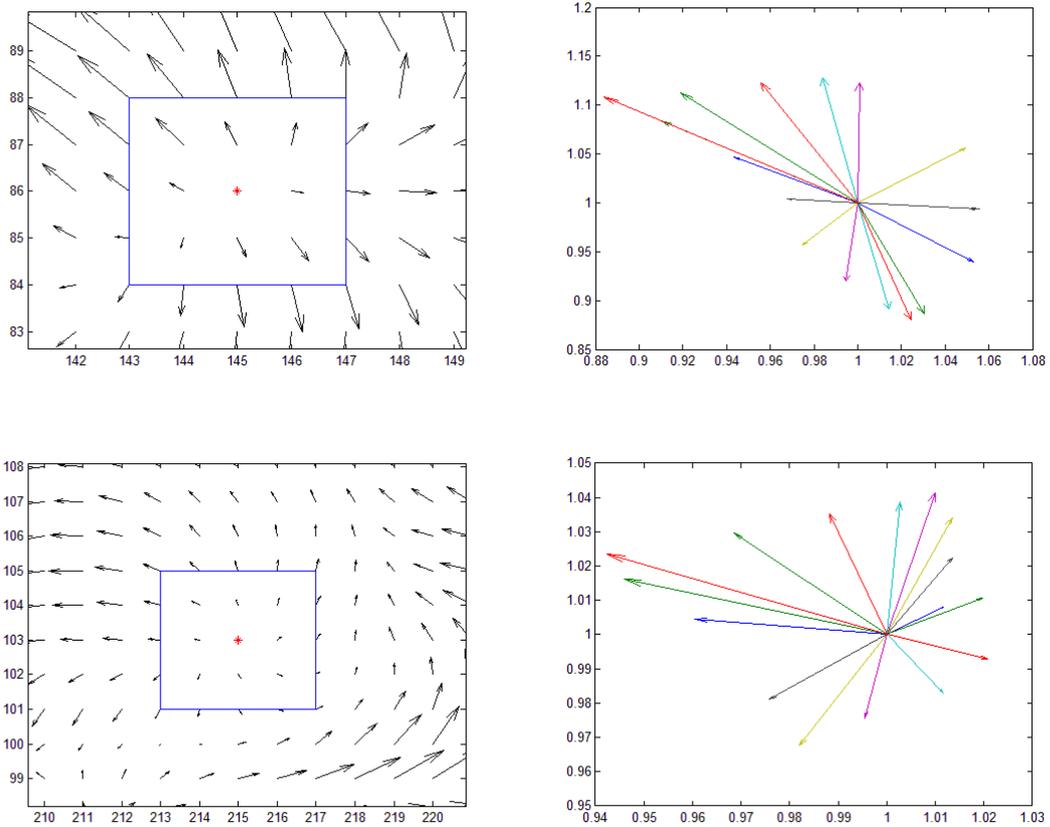


Figura 4.2.2.18

Área de 5x5. Se aceptan ambos candidatos a centros de giro, ya que cumplen el test de los vectores adyacentes. Resultado erróneo como se puede apreciar visualmente.

En muchos casos estos "antigros", como me he permitido denominarlos, podían llegar a pasar el test de detección descrito anteriormente. Por lo tanto, se vio necesaria la adición de otras heurísticas restrictivas al proceso, que además de asegurar un mejor resultado en la detección de centros de giros, evitaban ejecutar el test de los ángulos en muchos casos, mejorando ligeramente la eficiencia del método.

El proceso se inicia con la definición de cuatro bordes, uno por cada lado del cuadrado límite que enmarca a un potencial giro, denominados por simplicidad Norte, Sur, Este y Oeste (ver figura 4.2.2.19).

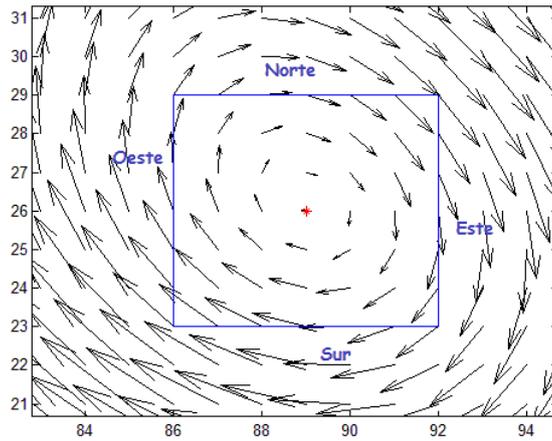


Figura 4.2.2.19

Denominación geográfica de los bordes de un giro.

A partir de aquí todas las restricciones que se indican a continuación han de cumplirse para una lista de candidatos a centros de giro; si una no se cumple, se dejan de comprobar las siguientes y se descarta ese candidato.

Primera Restricción

Se eligen cuatro vectores representativos de cada borde del cuadrado límite (uno por borde) y se comprueba si es posible que se dé una forma de remolino alrededor del candidato al centro del giro (ver figura 4.2.2.20).

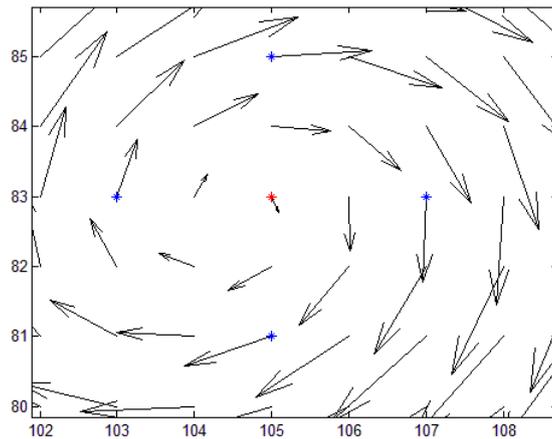
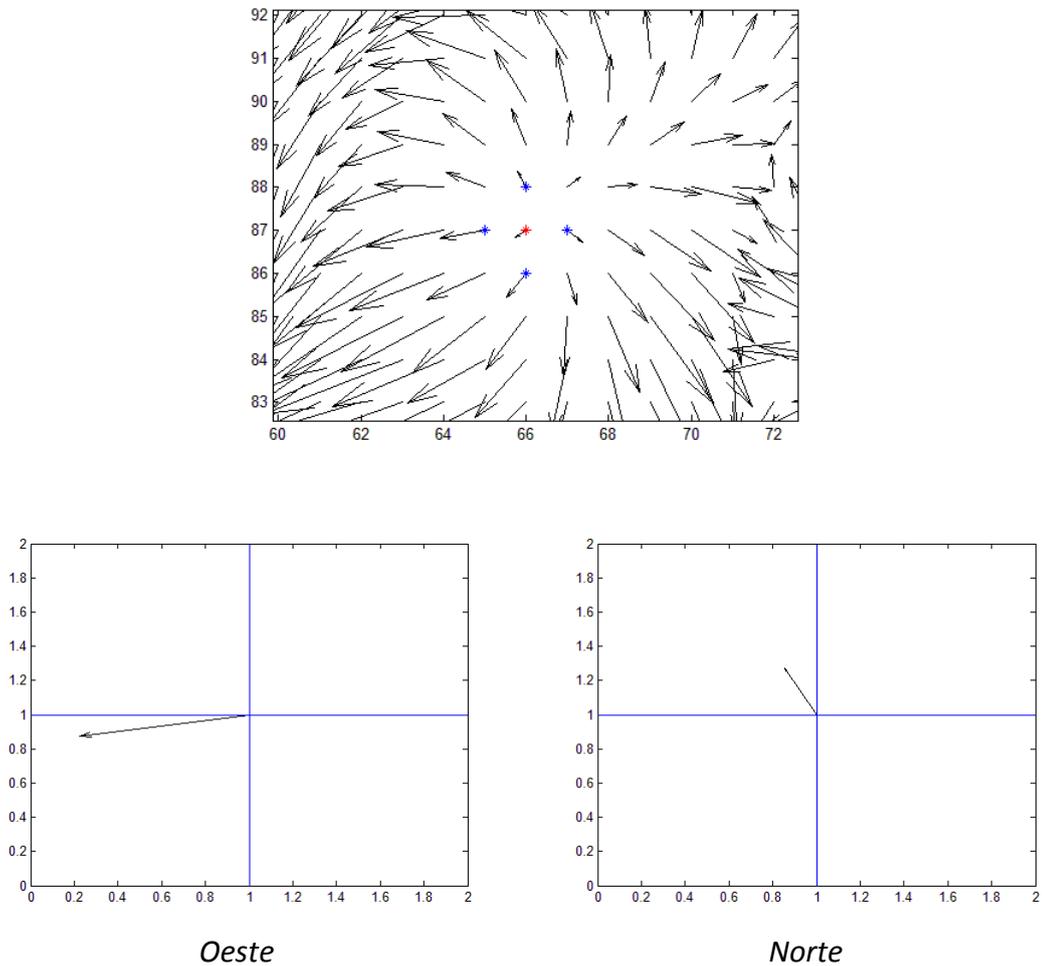


Figura 4.2.2.20

En rojo el centro del giro, en azul los cuatro vectores representativos suponiendo un área de 5x5.

Si el vector representativo Norte tiene componente U positiva, el vector representativo Sur tendrá que tener componente U negativa, el vector representativo Oeste tendrá que tener componente V positiva y el vector representativo Este tendrá que tener componente V negativa. También se acepta lo anterior cambiando la palabra “negativo” por “positivo” y viceversa.

Si no se cumple lo anterior, no se seguirán comprobando las demás restricciones para esa área, y se extenderá la misma para volver a comprobar las restricciones, y así sucesivamente hasta que se validen o se llegue al área máxima, en cuyo caso el centro de giro se elimina de la lista de candidatos. En la figura 4.2.2.21 se muestra un ejemplo representativo de este proceso.



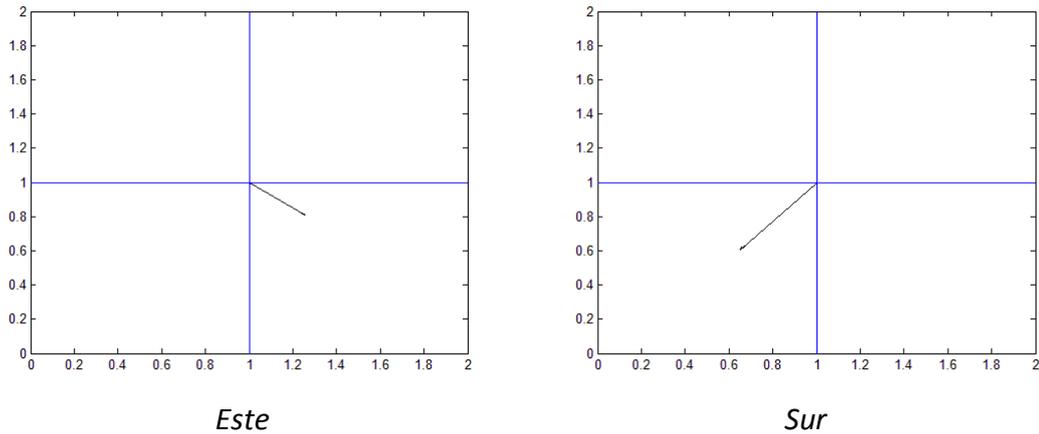


Figura 4.2.2.21

Para un área de 3x3 los cuatro vectores representativos (Oeste, Norte, Este, Sur). Se observa que no se cumple la primera restricción, ya que partiendo del vector Norte con U negativa, el vector Sur debería tener U positiva, el Oeste V negativa y el Este V positiva.

Segunda Restricción

Una segunda restricción evita que se acepten anti-giros, ya que éstos podrían pasar la primera y tercera restricción perfectamente y ser considerados giros erróneamente.

Se vuelven a elegir los mismo cuatro vectores representativos de cada borde del cuadrado límite y se obtienen sus ángulos.

- Los ángulos de los vectores representativos norte y sur han de estar entre 0 y 45 grados o entre 315 y 360 o entre 135 y 225.
- Los ángulos de los vectores representativos este y oeste han de estar entre 45 y 135 grados o entre 225 y 315.

Por supuesto, gracias a haber cumplido la primera restricción anteriormente, se evitan casos erróneos, como por ejemplo que los ángulos de los vectores norte y sur sean iguales.

Un ejemplo de vectores que cumplirían la segunda restricción se muestra en la figura 4.2.2.22.

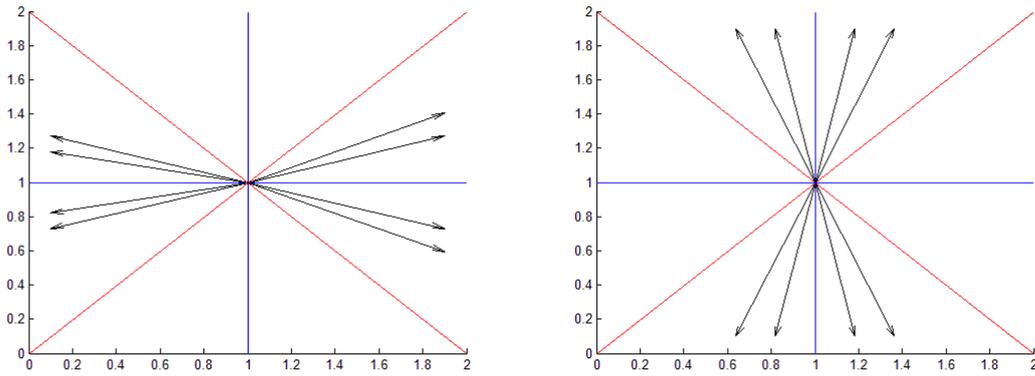


Figura 4.2.2.22

Ejemplo posibles vectores de los límites Norte y Sur y posibles vectores de los límites Este y Oeste.

Para que esta segunda restricción se acepte, no es necesario que los cuatro vectores representativos cumplan lo descrito anteriormente, ya que, valga la redundancia, sería demasiado restrictivo, y de hecho provoca una infra-detección de centros de giros. Por lo tanto, se estableció que la restricción quedaría satisfecha si tres o más vectores la cumplieran.

Tercera Restricción

La tercera restricción consiste en el test de comprobación del sentido uniforme de rotación alrededor del candidato al centro de giro que se había descrito en las primeras iteraciones.

4.2.2.6. SEXTA ITERACIÓN: CAMBIO EN LA DETECCIÓN DEL MÍNIMO DE CORRIENTE

Como se explicó en la segunda iteración, para aplicar las restricciones sobre los candidatos a centros de giros y comprobar si efectivamente se trataba de un giro o no, era necesario encontrar el mínimo local de magnitud de corriente. Esto se hacía buscándolo en un área alrededor del máximo/mínimo local del rotacional correspondiente. Sin embargo, y recordando lo que también se expuso entonces, era un problema saber la extensión del área sobre la que hacer la búsqueda, ya que con una muy grande se podría detectar un mínimo de corriente de otro giro u otra estructura, y con una muy pequeña se podría detectar un punto donde la magnitud de corriente no fuese la mínima local.

En base a lo anterior, se decidió cambiar la forma de detectar los mínimos de corriente partiendo de un máximo/mínimo del rotacional. Se trata de un procedimiento de búsqueda recursivo en el que, dado un punto del mapa, se compara la magnitud de corriente en este punto con las de los puntos adyacentes. Si dicho punto tiene la magnitud de corriente mínima, es la solución, si no, se vuelve a repetir el procedimiento a partir del punto con el mínimo de magnitud de corriente encontrado. En las figuras 4.2.2.23 y 4.2.2.24 se presenta un ejemplo de esta búsqueda.

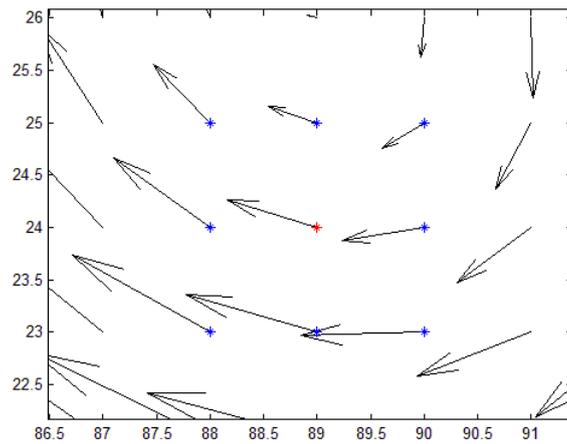


Figura 4.2.2.23

En rojo, el punto actual sobre el que se quiere comprobar si en el existe un mínimo de corriente respecto a sus vecinos.

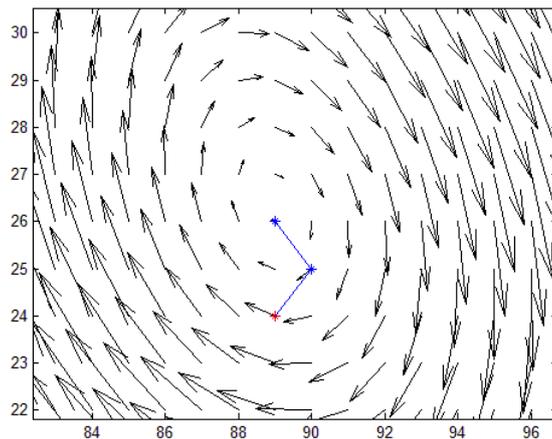


Figura 4.2.2.24

Camino recorrido desde un mínimo local del rotacional a un mínimo local de magnitud de corriente siguiendo el procedimiento recursivo.

Posteriormente se añadió al procedimiento una expansión del área de búsqueda en caso de encontrar la solución para evitar algunos fallos de detección. Se expande la búsqueda a un cuadrado límite inmediatamente superior al de los puntos adyacentes al actual. Si el punto a comprobar sigue teniendo el mínimo de magnitud de corriente, entonces se considera la solución final. En caso contrario se repite el proceso desde el principio, desde el punto del mínimo encontrado con la búsqueda expandida, tal y como se muestra en la figura 4.2.2.25.

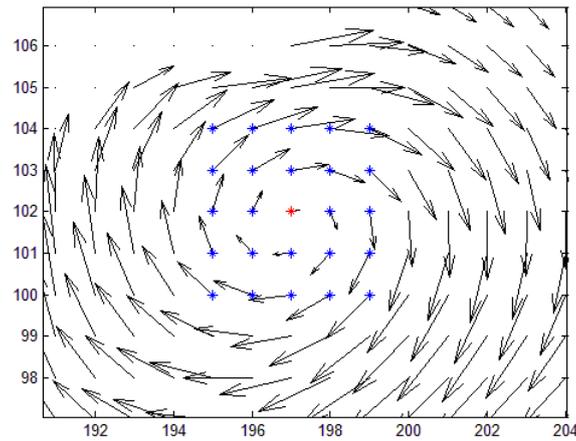


Figura 4.2.2.25

Ratificación en el área expandida de un mínimo local de magnitud de corriente.

4.2.2.7. SÉPTIMA ITERACIÓN

La utilización del nuevo método de detección de los mínimos locales de magnitud de corriente a partir de los máximos/mínimos locales del operador rotacional mejoró el método de detección de centros de giro de forma global, sin embargo también introdujo una nueva eventualidad que era preciso solucionar.

El procedimiento de detección empieza a partir de los máximos/mínimos locales del rotacional y les asigna a cada uno un punto con su mínimo de corriente correspondiente. El problema está en que varios max/min del rotacional diferentes pueden tener asignados el mismo punto de mínimo de corriente (ver figura 4.2.2.26), lo cual produce una multiplicación en la ejecución de los test de restricciones anteriormente explicados. En consecuencia, se podrían llegar a detectar varios giros donde solamente hay uno, lo que provocará errores en la estimación de la forma de cada uno de estos "falsos giros". Esta sobredetección generaba resultados erróneos a la hora de estimar la forma de los giros (por el método del rotacional explicado más adelante), ya que se apreciaban varias estimaciones alrededor del mismo punto. En la figura 4.2.2.27 se pueden ver, ejemplos de los resultados de estimación que se generaban antes de haber resuelto este problema.

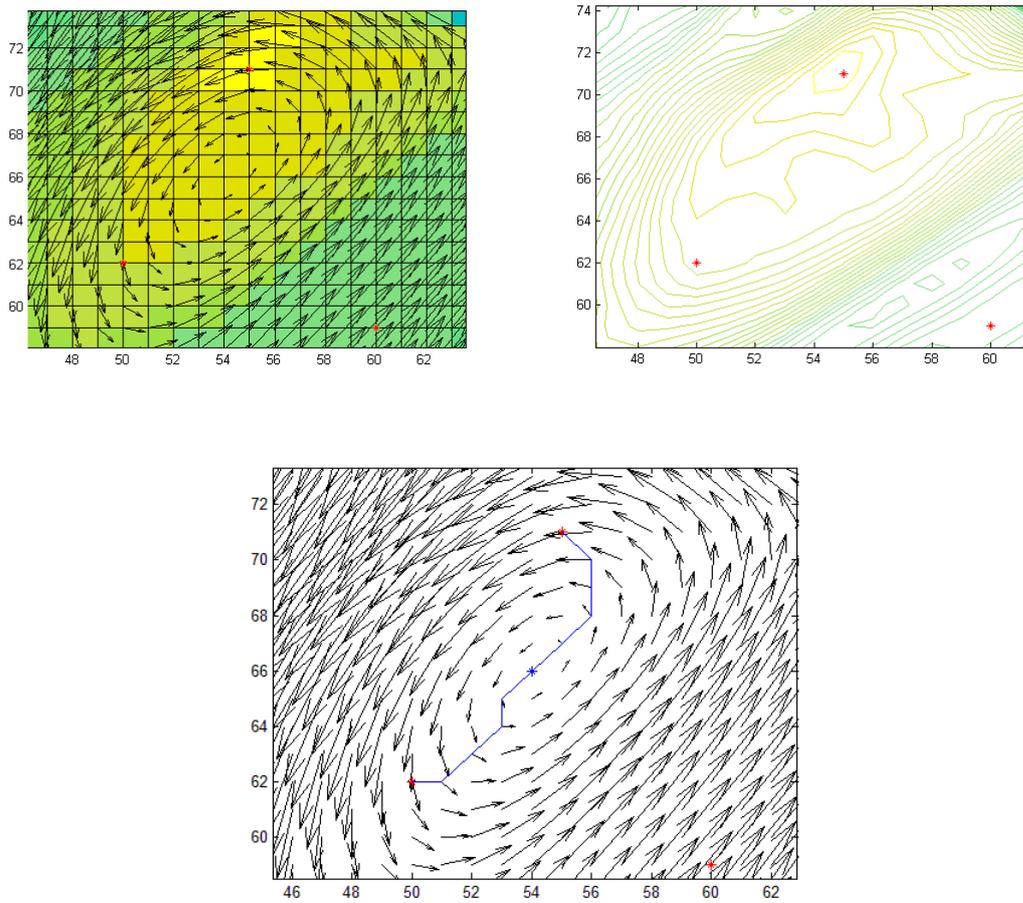


Figura 4.2.2.26

Ejemplo de dos máximos locales del rotacional a los que se les asocia el mismo punto con un mínimo local de magnitud de corriente.

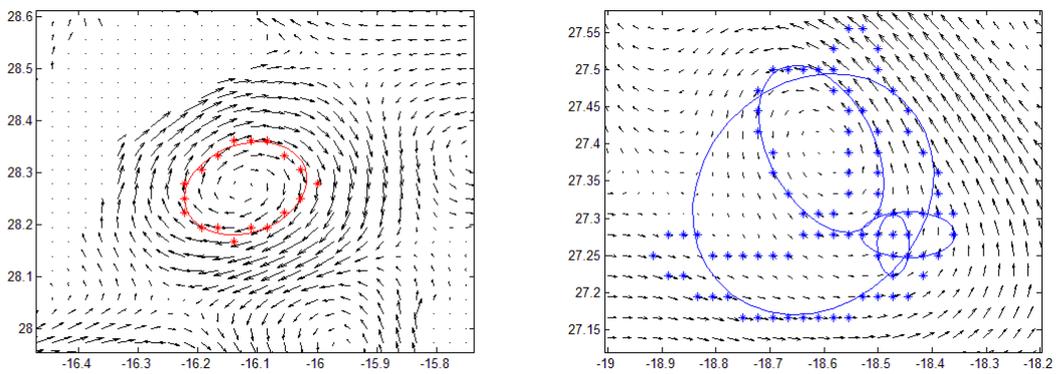


Figura 4.2.2.27

Ejemplos de estimación de forma a partir del rotacional con mínimos locales de corriente compartidos.

Por consiguiente había que definir una fórmula o criterio de asignación única de mínimos de corriente a max/min del rotacional. O dicho de otra forma, conseguir que un punto encontrado con la magnitud mínima local de corriente, sólo tenga un max/min del rotacional asociado.

Los criterios que se tuvieron en cuenta para solucionar esto fueron los valores de los max/min y la distancia de éstos al mínimo de corriente. Estos criterios se combinaron obteniendo una heurística basada en las distintas pruebas realizadas que se computa con la siguiente fórmula:

$$H_i = \frac{K_1 D_i}{F} + K_2 |V_{max/min} - V_i|$$

donde D_i es la distancia euclídea de cada max/min del rotacional asociado con un mínimo de corriente a dicho mínimo de corriente. F es un factor de tamaño dado por:

$$F = \frac{lon_{size} + lat_{size}}{2}$$

$V_{max/min}$ es el valor máximo o mínimo de los valores de los máximos o mínimos locales del rotacional asociados al mismo centro de giro, según sea ciclónico o anticiclónico (máximo para los ciclónicos y mínimo para los anticiclónicos).

$$V_{max/min} = \max/\min (V_i)$$

V_i es cada uno de los valores de los puntos máximos o mínimos locales del rotacional. K_1 y K_2 son dos constantes cuyo valor asignado basado en pruebas es de:

$$K_1 = 100$$

$$K_2 = 40$$

Aquellos max/min del rotacional con una heurística menor, para cada mínimo de corriente encontrado a partir de ellos, les sería asignado el punto con el mínimo de corriente, y los demás se eliminarían del conjunto. En la figura 4.2.2.29 se muestra un ejemplo ilustrativo.

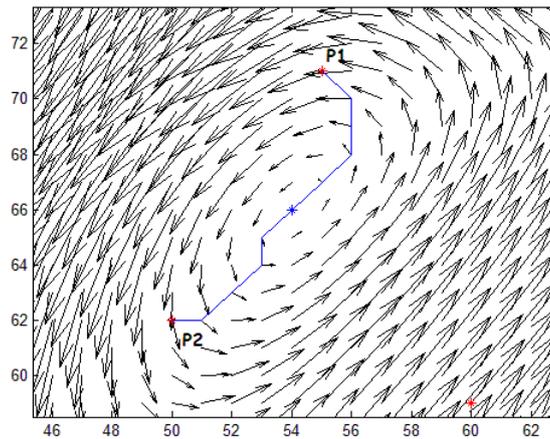


Figura 4.2.2.29

Ejemplo de dos extremos del rotacional (P1 y P2, en rojo) que comparten el mismo mínimo común (en azul). Se obtienen los valores $D1 = 5.0990$ y $V1 = 0.0790$, $D2 = 5.6569$ y $V2 = 0.0680$, y $F = 199$. La heurística correspondiente es $H1 = 2.5623$ y $H2 = 3.2827$, con lo que se elige P1.

4.2.3. PROCESO DE DISEÑO DE LA ESTIMACIÓN DE LA FORMA DE GIROS BASADO EN EL ROTACIONAL

Al diseñar los prototipos que se describen a continuación, ya se estaban diseñando paralelamente los prototipos correspondientes a la detección de los centros de giros. Por lo tanto a partir de aquí se asumirá que al hablar de mínimos o máximos del rotacional se está haciendo referencia a los que están asociados con un mínimo local de magnitud de corriente.

4.2.3.1. PRIMERA ITERACIÓN: ROTACIONAL

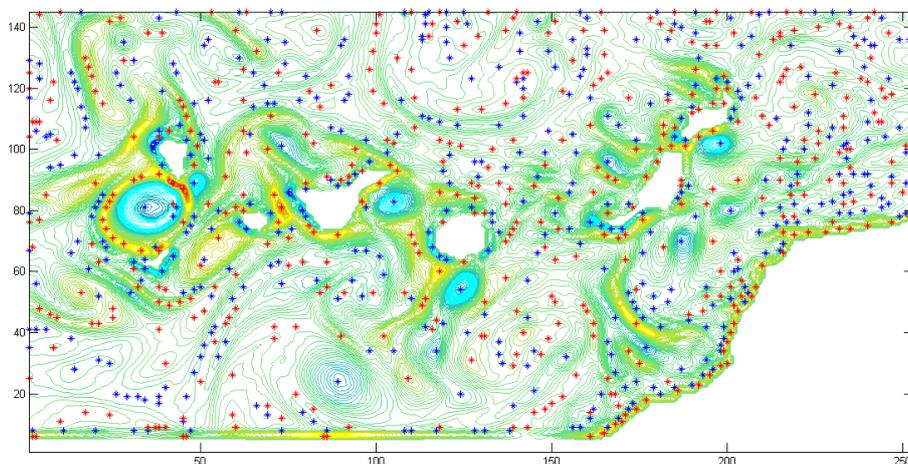


Figura 4.2.3.1

Mapa con los contornos de la superficie generada por el rotacional con los máximos locales (rojo) y lo mínimos locales (azul).

Viendo la forma de la curva generada por el rotacional (ver figura 4.2.3.1), se pensó en definir la forma del giro como una cierta área alrededor del mínimo/máximo local del rotacional. El problema, por tanto, era averiguar el valor del rotacional que limitara el área del giro, es decir, definir un umbral genérico, que sirviera tanto para los giros ciclónicos como anticiclónicos, con el que estimar la localización de los límites de los giros y por lo tanto su forma. Este umbral se usaría como valor frontera en la adaptación y utilización de un algoritmo de inundación que fuera obteniendo los puntos del borde.

En la figura 4.2.3.2 se muestra un ejemplo del resultado esperado.

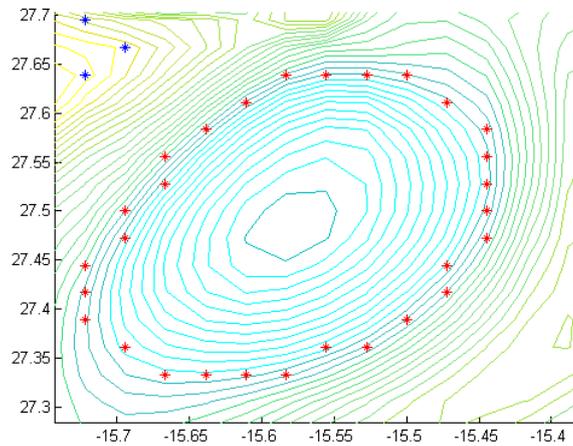


Figura 4.2.3.2

Ejemplo de la detección de un contorno de un giro aplicando un algoritmo de inundación con un umbral de 0.

Los umbrales que se probaron inicialmente fueron que el valor del rotacional llegase a cero o que superase por debajo o por encima el valor de la media global del rotacional del mapa. Ambos umbrales se descartaron ya que, aunque para algunos giros funcionaban adecuadamente debido a que estaban aislados de otros valores altos o bajos del rotacional, para la mayoría de casos no funcionaba debido a que el valor 0 del rotacional no se tiene por qué alcanzar necesariamente, al igual que la media del rotacional (ver figura 4.2.3.3).

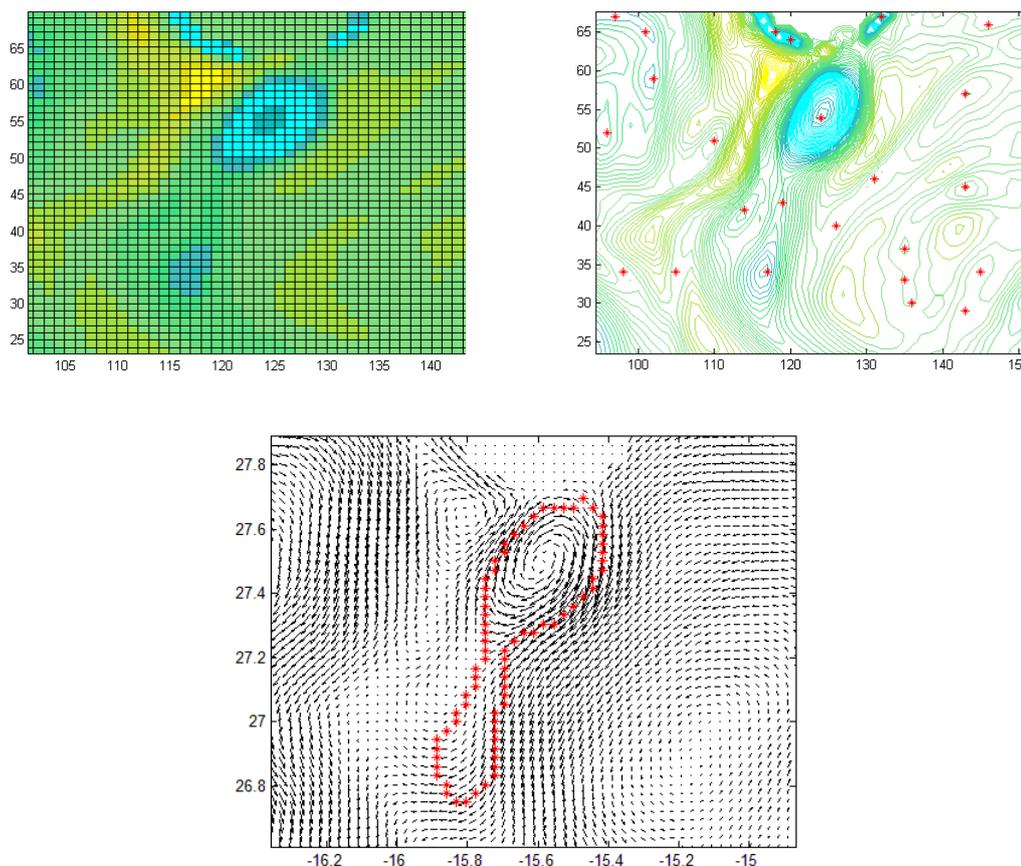


Figura 4.2.3.3

Se observa cómo al obligar a que el valor del rotacional sea nulo, en muchos casos no se llega a alcanzar dicho valor en el borde del giro y da como resultado un límite erróneo.

4.2.3.2. SEGUNDA ITERACIÓN: PENDIENTE NULA

Viendo el mal resultado de los umbrales se decidió abandonar la vía de un valor umbral y definir el límite del giro basándose en la pendiente del rotacional. Por lo tanto, el algoritmo de inundación se adaptó para que el caso base, en vez de superar, por encima o por debajo, un determinado umbral, consistiese en que la pendiente de la curva del rotacional fuese nula (con una ventana de aceptación). En las figuras 4.2.3.4 y 4.2.3.5 se muestran ejemplos de la información a procesar y los resultados esperables.

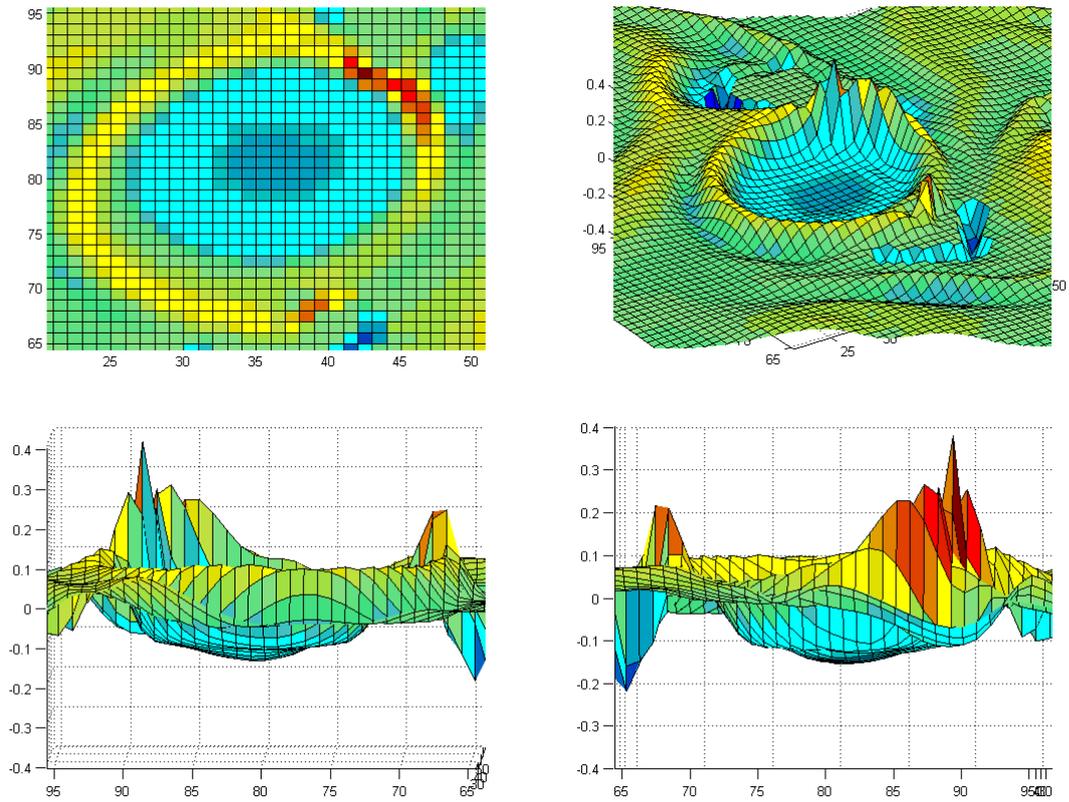


Figura 4.2.3.4

Imágenes desde distintas perspectivas de la superficie generada por el operador rotacional en las inmediaciones de un giro en el mapa.

Por lo tanto, el algoritmo de inundación se adaptó para que el caso base, en vez de superar, por encima o por debajo, un determinado umbral, consistiese en que la pendiente de la curva del rotacional fuese nula (con una ventana de aceptación).

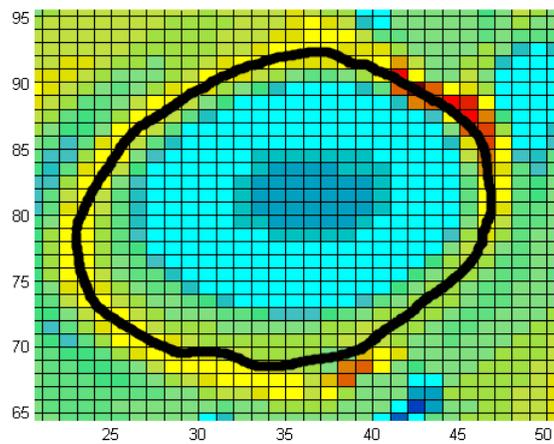


Figura 4.2.3.5

Puntos del mapa en los que la pendiente es nula partiendo de un mínimo local del rotacional

Para poder hallar la pendiente del rotacional en un punto, al ser una superficie 3D, era necesario conocer el valor del rotacional en el punto en cuestión y en el siguiente punto en dirección opuesta al max/min local del rotacional. Dado que la superficie está discretizada en forma de grid, había que calcular el punto siguiente de una recta virtual desde el max/min del rotacional al punto en cuestión cuya pendiente se quería calcular (ver figura 4.2.3.6). Esto se hizo mediante una adaptación del algoritmo de Bresenham.

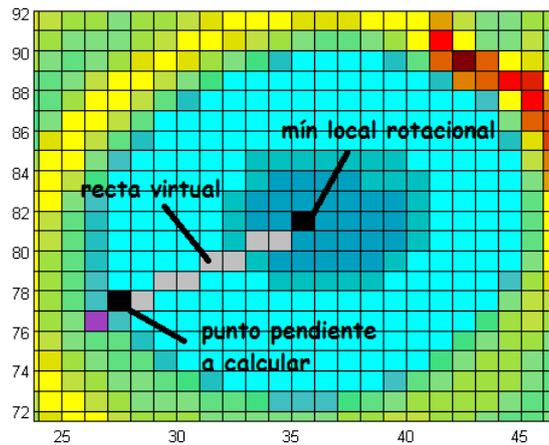


Figura 4.2.3.6

Ejemplo de cálculo de la pendiente. La resta del valor del rotacional en el punto cuya pendiente se quiere calcular con el valor del siguiente punto en dirección opuesta al mínimo local del rotacional.

Esta solución volvió a generar los problemas de la primera iteración ya que había giros alrededor de los cuales la pendiente no se anulaba o se anulaba en puntos muy alejados de la forma real del giro, y por lo tanto surgían resultados inesperados.

4.2.3.3. TERCERA ITERACIÓN: COMBINACIÓN UMBRAL Y PENDIENTE

A partir de los resultados obtenidos en la iteración anterior se decidió que usar la pendiente como caso base para el algoritmo de inundación daba resultados no aceptables. Así que se volvió a definir el caso base como el alcance de un determinado valor del rotacional. La diferencia con la primera iteración descrita anteriormente es que en este caso, para cada giro se define un umbral del rotacional diferente.

La forma de obtener este valor o umbral es detectando los valores del rotacional para los que la pendiente en valor absoluto comienza a dejar de aumentar (de este modo se abarca tanto los giros ciclónicos como los anticiclónicos), es decir, los valores del rotacional en los puntos de inflexión de la curva. Haciendo esto, como es lógico, por

cada giro se obtiene un valor del rotacional para cada punto de inflexión, tal y como se muestra en la figura 4.2.3.7.

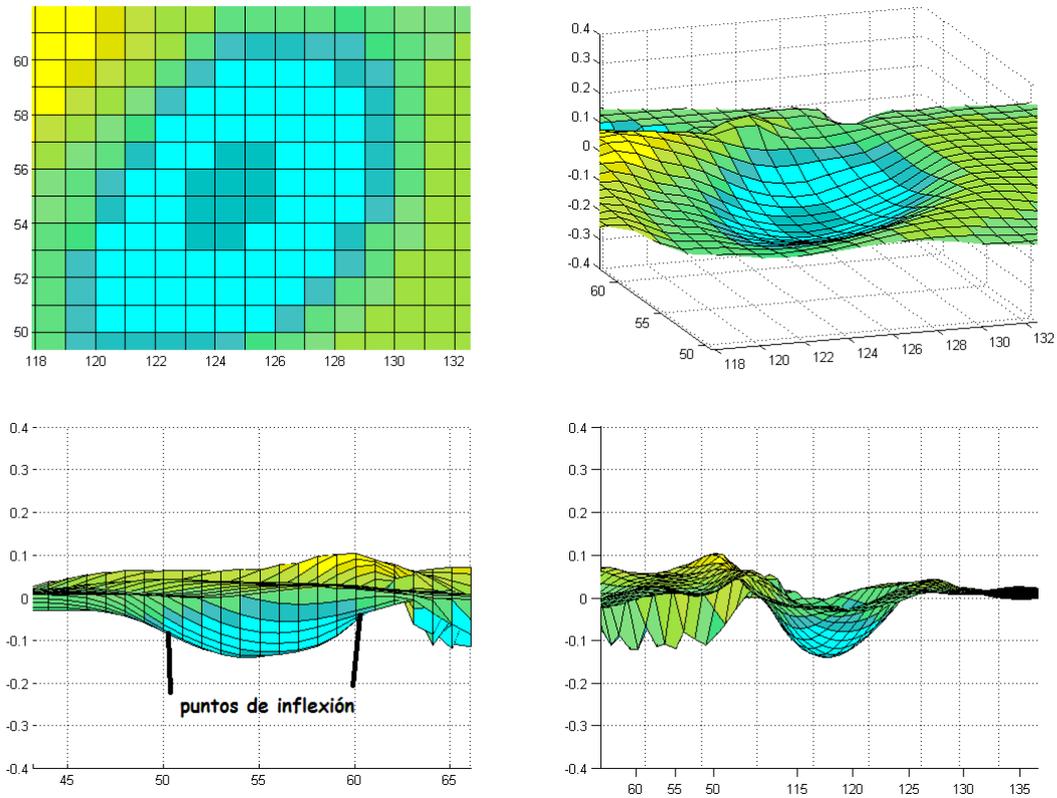


Figura 4.2.3.7

Imágenes de un giro mostrando la curva que se genera y dos de los puntos de inflexión de la misma.

Para mayor simplificación se abandonó el uso del algoritmo de Bresenham, y en vez de obtener todos los puntos alrededor de un max/min local del rotacional en los que la pendiente en valor absoluto dejaba de aumentar, se optó por recorrer a partir del max/min 8 direcciones hasta encontrar 8 puntos que cumplieran la condición descrita. Al ser rectas diagonales, horizontales y verticales se puede saber cuál es el siguiente punto sin necesidad de la utilización del algoritmo de Bresenham, de forma que se ganó en velocidad. En la figura 4.2.3.8 se ilustra este procedimiento.

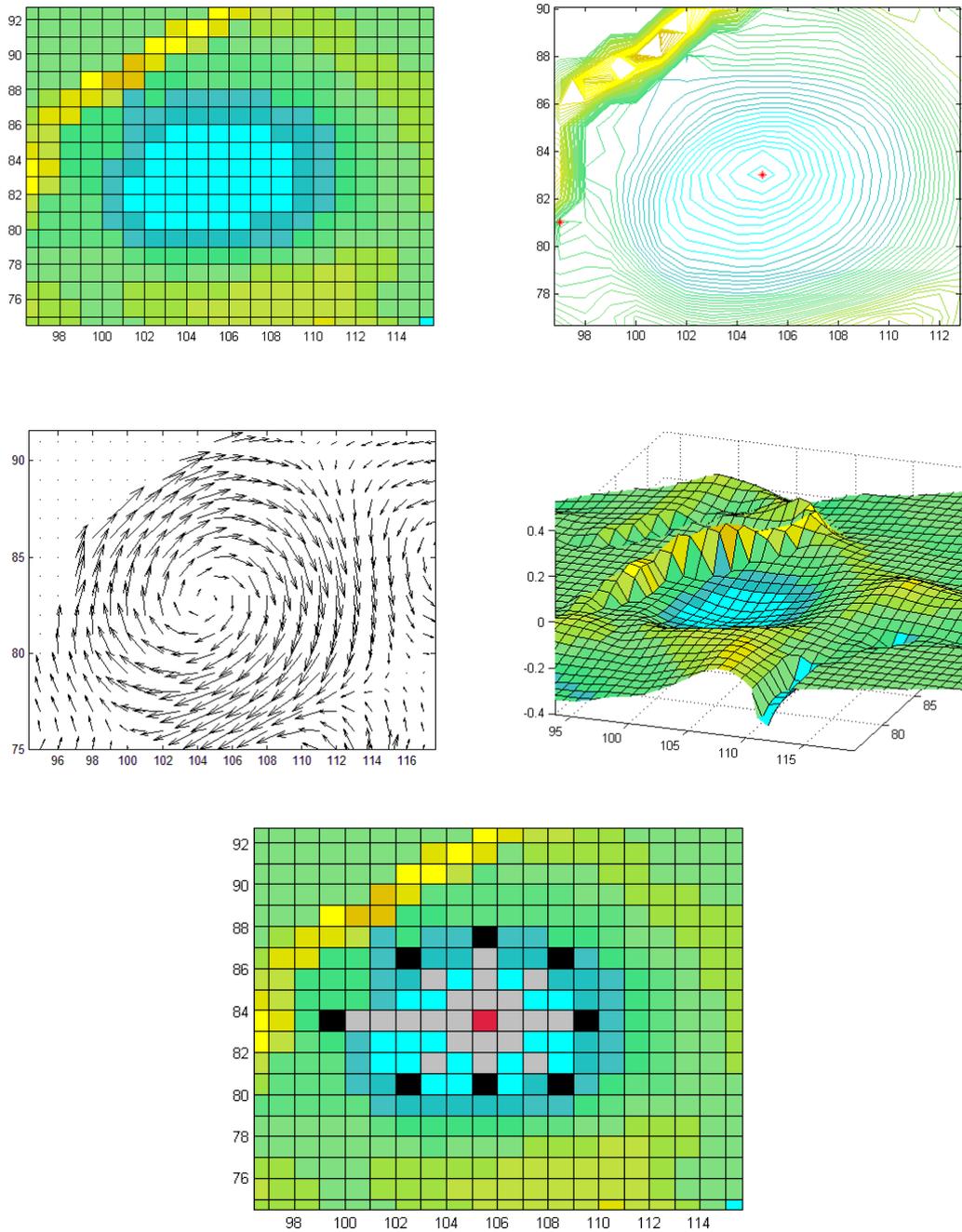


Figura 4.2.3.8

Ejemplo de la obtención de los 8 puntos en los que la pendiente del rotacional en valor absoluto deja de crecer.

La cuestión a partir de aquí era saber qué valor del rotacional usar de entre los varios (8) hallados. La primera solución a esto fue elegir como umbral para el algoritmo de inundación la media de los valores del rotacional hallados (tabla 4.2.3.1).

1	2	3	4	5	6	7	8	Media
-0.0313	-0.0440	-0.0402	-0.0485	-0.0593	-0.0545	-0.0687	-0.0650	-0.0514

Tabla 4.2.3.1

Valores del rotacional de los 8 límites del giro anterior y su media.

Sin embargo haciéndolo de esa forma, surgían algunos fallos como los descritos en la primera iteración. Al usar la media de los valores, hay puntos del borde del giro en los que no se llega a alcanzar dicho valor, con lo cual el algoritmo de inundación seguirá buscando ese valor saliéndose del giro esperado y obteniendo como resultado un giro mucho mayor, o en algunos casos no obteniendo resultado. Este efecto puede observarse en la figura 4.2.3.9.

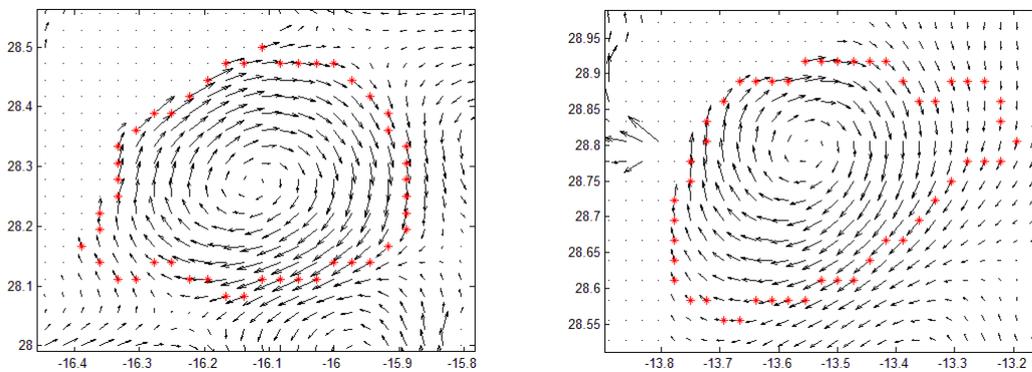


Figura 4.2.3.9

Casos en los que el algoritmo de inundación sobrestima la forma del giro llegando ésta a ser errónea.

Al final se decidió usar el valor mínimo o máximo de los rotacionales encontrados, según sea un giro ciclónico o anticiclónico. De este modo, aunque en algunos casos el tamaño del giro sea subestimado (ver figura 4.2.3.10), se consigue una solución de compromiso que impide las anomalías descritas anteriormente.

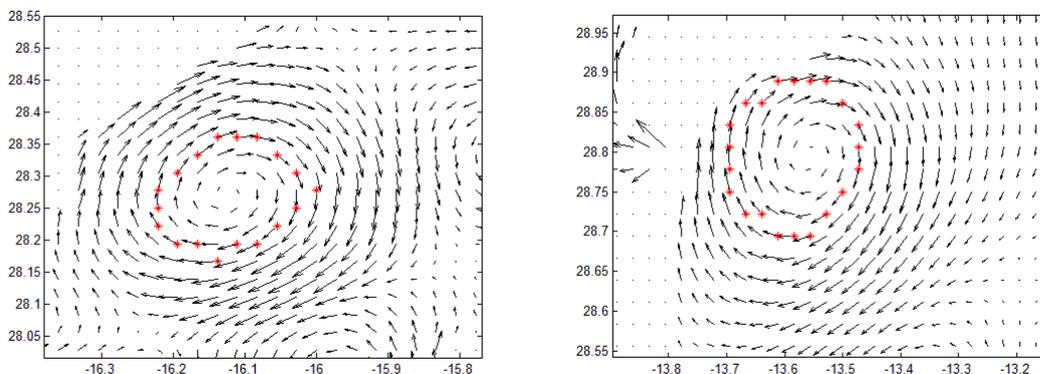


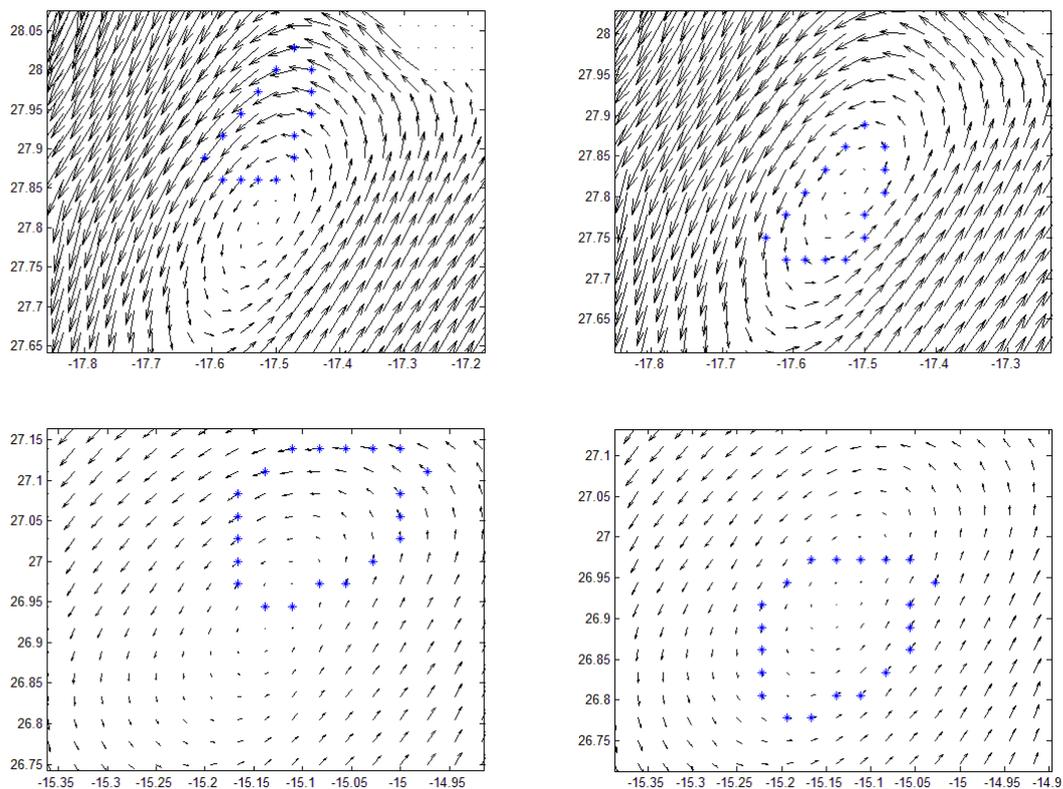
Figura 4.2.3.10

Estimación de la forma de los giros usando el valor mínimo (en este caso, ya que es un giro anticlónico) de los 8 puntos encontrados donde la pendiente del rotacional en valor absoluto deja de aumentar. En comparación con la figura 4.2.3.9 se aprecia una subestimación de la forma.

4.2.3.4. CUARTA ITERACIÓN: DESPLAZAMIENTO DE LA ESTIMACIÓN DE FORMA

En el apartado de detección de los centros de los giros se habló de los giros asimétricos y la tendencia del operador rotacional a desplazar sus máximos y mínimos a las zonas de los giros con mayores magnitudes de corriente. Es por esta razón por la que se hizo necesaria la búsqueda de mínimos locales de magnitud de corriente a partir de los máximos y mínimos locales del rotacional. Por lo tanto, y tras estimar la forma de un giro, es necesario desplazar los puntos que conforman su borde y centrarlos con el centro real del giro, distinguiéndose entre centro rotacional y centro real.

En la figura 4.2.3.11 se presenta una comparativa de los resultados obtenidos para diferentes casos de ejemplo.



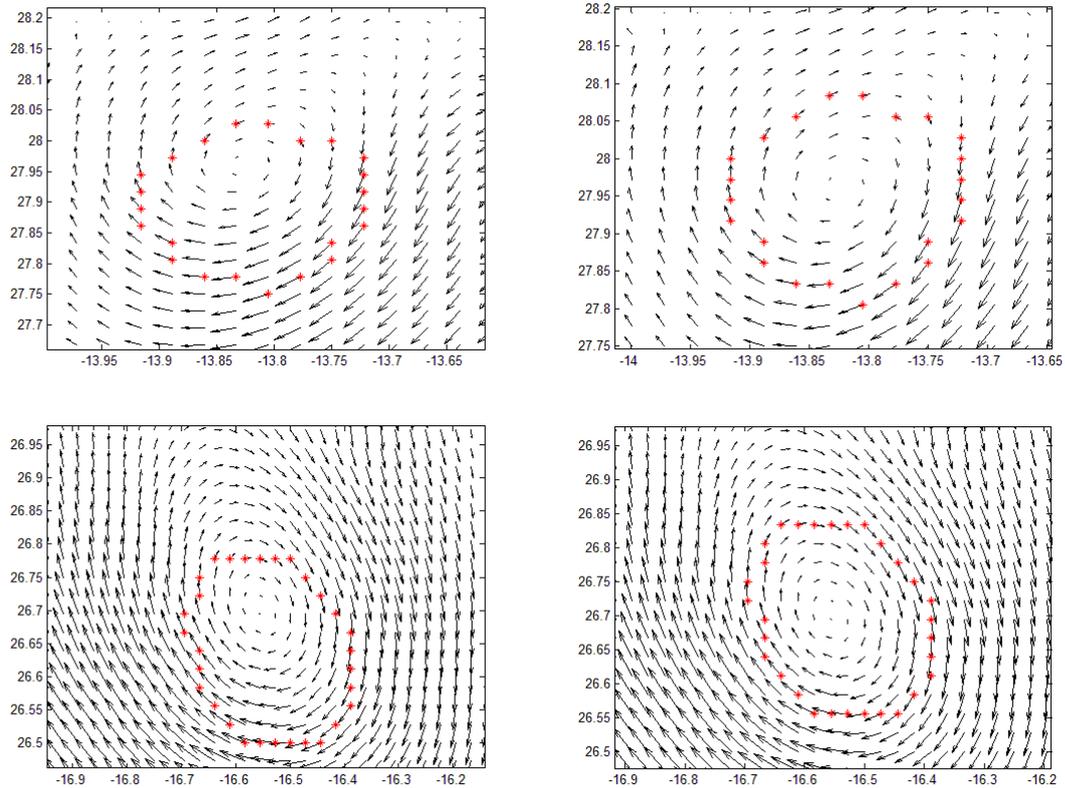


Figura 4.2.3.11

Comparativas de estimaciones de forma sin desplazar y desplazándola tomando como centro el centro real del giro.

4.2.4. DISEÑO DE MÉTODO ALTERNATIVO

Debido a que se había agotado el tiempo previsto para analizar las posibilidades de mejora de los resultados por medio de la utilización del método de estimación de la forma de los giros basado en el rotacional, y ya que por sus características no podían proporcionar resultados más precisos, se decidió intentar desarrollar otro tipo de métodos de estimación sin basarse en la curva generada por el rotacional, sino enteramente heurístico y basado únicamente en el campo vectorial. En esta sección se explica un intento alternativo fallido utilizando únicamente el campo vectorial.

El presente método se basa en seguir la tendencia de la dirección de los vectores alrededor del centro del giro hasta encontrar un contorno del mismo.

Dado un punto cualquiera, éste tendrá dos posibles candidatos a ser el siguiente punto del contorno del giro basándose en las componentes U y V del vector de dicho punto:

- Si el vector tiene componente U positiva y componente V positiva

- Si la componente U en valor absoluto es mayor que la V, los candidatos serán (punto_lon + 1, punto_lat) y (punto_lon + 1, punto_lat + 1).
- Si la componente V en valor absoluto es mayor que la U, los candidatos serán (punto_lon + 1, punto_lat + 1) y (punto_lon, punto_lat + 1).
- Si el vector tiene componente U positiva y componente V negativa.
 - Si la componente U en valor absoluto es mayor que la V, los candidatos serán (punto_lon + 1, punto_lat) y (punto_lon + 1, punto_lat - 1).
 - Si la componente V en valor absoluto es mayor que la U, los candidatos serán (punto_lon + 1, punto_lat - 1) y (punto_lon, punto_lat - 1).
- Si el vector tiene componente U negativa y componente V positiva
 - Si la componente U en valor absoluto es mayor que la V, los candidatos serán (punto_lon - 1, punto_lat) y (punto_lon - 1, punto_lat + 1).
 - Si la componente V en valor absoluto es mayor que la U, los candidatos serán (punto_lon - 1, punto_lat + 1) y (punto_lon, punto_lat + 1).
- Si el vector tiene componente U negativa y componente V negativa.
 - Si la componente U en valor absoluto es mayor que la V, los candidatos serán (punto_lon - 1, punto_lat) y (punto_lon - 1, punto_lat - 1).
 - Si la componente V en valor absoluto es mayor que la U, los candidatos serán (punto_lon - 1, punto_lat - 1) y (punto_lon, punto_lat - 1).

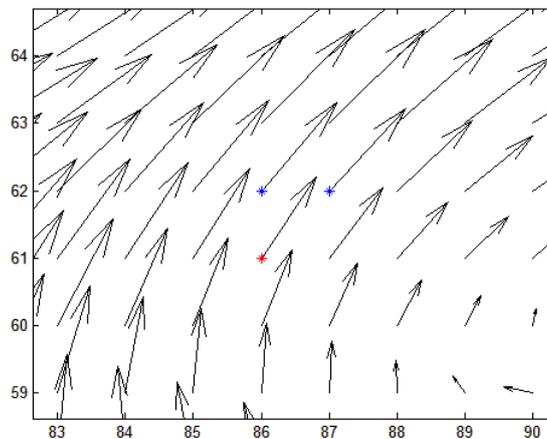


Figura 4.2.4.1

Ejemplo de candidatos a seguir el contorno cuando ambas componentes son positivas y la V es mayor que la U.

A continuación hay que elegir cuál de los dos candidatos será elegido para continuar con la definición del contorno. Esto se hace mirando el ángulo de los tres vectores: el del punto actual y los de los dos candidatos. El candidato cuyo ángulo de su vector sea más similar al del punto actual será el punto siguiente del contorno.

Por ejemplo, en el caso de la figura 4.2.4.1, el siguiente punto sería el candidato vertical, ya que el ángulo del vector del punto actual es de 0.9793 radianes, el del candidato diagonal es de 0.8245 radianes y el del candidato vertical 0.8664 radianes, y por lo tanto es un ángulo más cercano al del actual.

Otra cuestión a tener en cuenta era la condición de parada del algoritmo. Al final se decidió finalizar al llegar a un punto cuyo ángulo respecto a la horizontal fuera igual o superior al ángulo inicial.

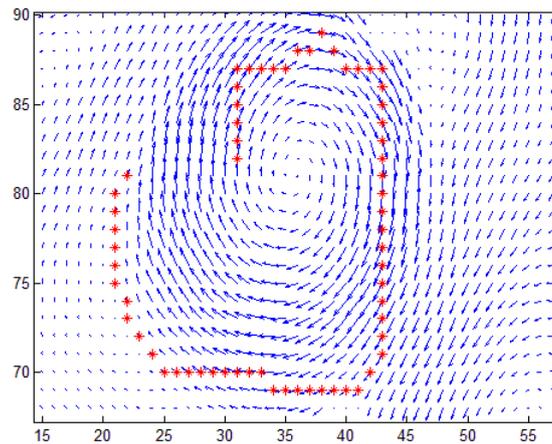


Figura 4.2.4.2

Resultado al aplicar el método sobre un centro de giro conocido, empezando por un punto al azar. Se puede ver como el contorno tiende a alejarse del centro del giro.

El método fue descartado porque sus resultados eran poco adecuados, del tipo mostrado en la figura 4.2.4.2, y muy frecuentemente tendían a generar un rectángulo alrededor del centro del giro.

Se pensó posteriormente en cambiar la forma de elegir a uno de los dos candidatos a siguiente punto. En vez de elegir aquel cuyo ángulo de su vector fuera el más cercano, primero se probó con el que tuviera el ángulo más tendente a girar hacia el interior, produciendo como resultado que el contorno acabara en el centro del giro. Por lo tanto se abandonó esta vía ya que no producía resultados satisfactorios, aunque no se descarta que añadiendo heurísticas y más restricciones, de alguna manera se podrían haber conseguido resultados aceptables.

4.3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA EN SU FORMA FINAL

En este apartado se describe el diseño del sistema en su forma final. En aras de una mayor facilidad de la lectura, se repiten aquí nuevamente aspectos que ya se recogieron en la descripción del proceso evolutivo de desarrollo, en vez de remitir al lector al apartado correspondiente. No obstante, también se incluyen elementos

nuevos como puede ser el caso del método de estimación de la forma por ajuste de elipses al campo vectorial.

4.3.1. CARACTERIZACIÓN MANUAL DE GIROS

Desde un principio se decidió utilizar, para caracterizar la forma y el tamaño de los giros, las curvas elípticas. Este conjunto de formas permiten modelar con suficiente precisión la mayoría de estas estructuras oceánicas (ver un ejemplo en la figura 4.3.1.1), a la vez que se gana en usabilidad, ambos requisitos no funcionales descritos anteriormente.

El uso de otras formas de marcado como que el usuario señalara el contorno del giro sin restricciones, hacían el proceso mucho más lento y tedioso, a la vez que añadían mucha complejidad a la hora de comparar los resultados entre la caracterización automática y la manual.

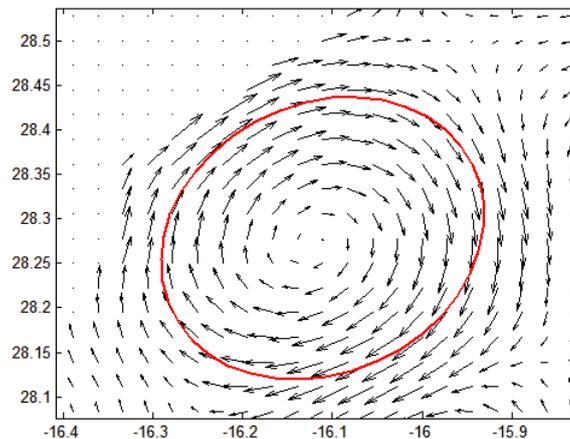


Figura 4.3.1.1

Ejemplo de un giro que puede ser representado correctamente mediante una elipse.

4.3.1.1. MARCADO DE LOS CENTROS DE GIRO

El marcado de los centros constituye la parte más fácil de la caracterización de los giros. Simplemente se estableció que con el ratón se pudiese señalar la ubicación en el mapa de los centros de los giros, y que apareciese en el mismo una señal de dicha ubicación, tal y como se muestra en la figura 4.3.1.2.

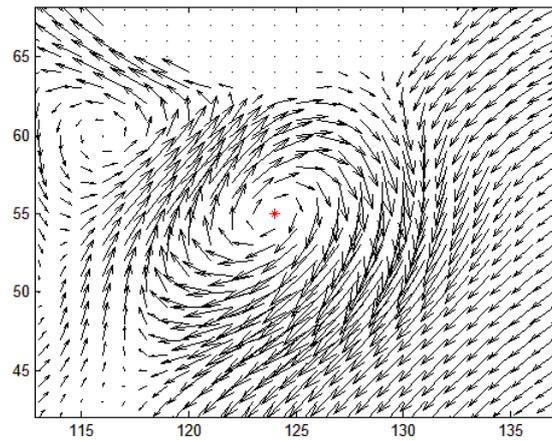


Figura 4.3.1.2

Ejemplo de marcado de un centro de giro.

4.3.1.2. SELECCIÓN DEL PRIMER RADIO

El primer radio o radio 1 solo se podrá determinar tras seleccionar el centro. Se decidió definir como radio 1 el situado en el primer cuadrante. Esto se le indica al usuario con unos ejes dentro de los cuales, pinchando con el ratón, se podrá marcar dicho radio, tal y como se muestra en la figura 4.3.1.3. Se estableció este mecanismo para tener definidos claramente cuáles eran los radios según el cuadrante en el que se encontraran.

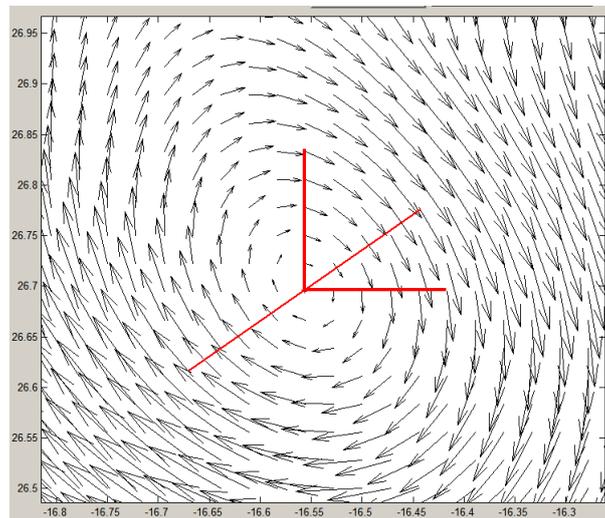


Figura 4.3.1.3

Ejemplo del marcado del radio 1 y los ejes que delimitan el lugar donde éste puede ser marcado.

4.3.1.3. SELECCIÓN DEL SEGUNDO RADIO

El segundo radio o radio 2 solo se podrá definir tras seleccionar el radio 1. Por lo tanto el radio 2 solo podrá modificar su longitud pero no su ángulo, ya que ha de ser perpendicular al radio 1 para que formen los ejes de una elipse. Al igual que con el radio 1, se dibujan unos ejes para indicar al usuario dónde puede picar con el ratón, tal y como se muestra en la figura 4.3.1.4.

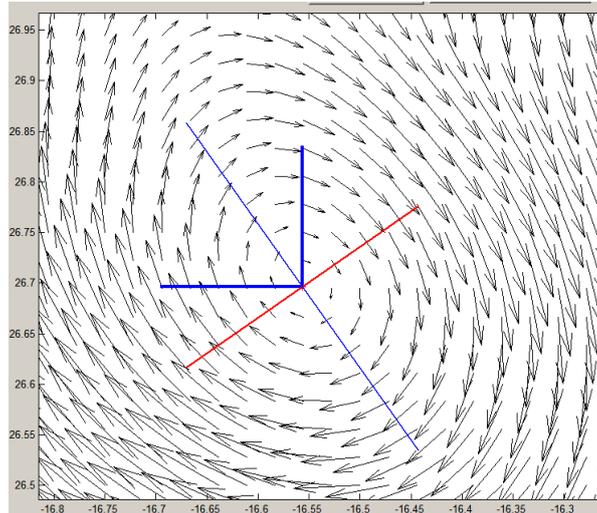


Figura 4.3.1.4

Ejemplo del marcado del radio 2 (en azul) y los ejes que delimitan el lugar donde éste puede ser marcado.

4.3.1.4. DIVISIONES DEL GIRO

Tal y como se describió en el capítulo de análisis, el volumen del giro se modela discretizándolo en secciones verticales, radiales y angulares, asignando un valor de velocidad representativo a cada una de ellas. En la figura 4.3.1.5 se muestra un ejemplo de división 2D a una profundidad determinada.

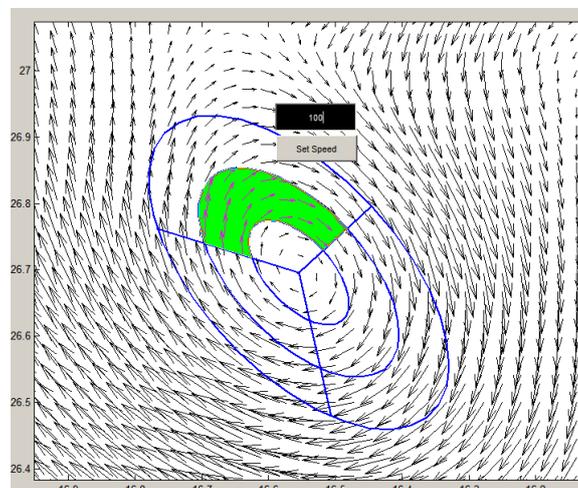


Figura 4.3.1.5

Ejemplo de la asignación de velocidad a una sección del giro.

4.3.1.5. SELECCIÓN DE LA FORMA 3D DEL GIRO

Se quería evitar en este punto, que el usuario tuviera que marcar la forma del giro en cada nivel de profundidad. Por lo tanto se ideó un mecanismo de interpolación de la forma de los giros.

Dado un giro cuya forma ha sido definida a dos profundidades diferentes, se interpolan linealmente todas las características básicas, como la ubicación de su centro, sus radios, su ángulo y las velocidades asignadas a cada sección (ver figuras 4.3.1.6, 4.3.1.7 y 4.3.1.8). Se puede caracterizar el giro cuantas veces se quiera en la superficie que se quiera, y volver a interpolar las superficies hasta que el resultado de la interpolación sea aceptable. Con este método se ahorra muchísimo tiempo, ya que el número de superficies a caracterizar es mucho menor.

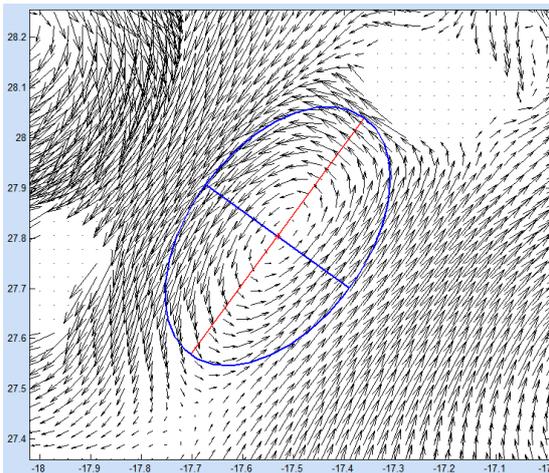


Figura 4.3.1.6

Superficie a profundidad 1

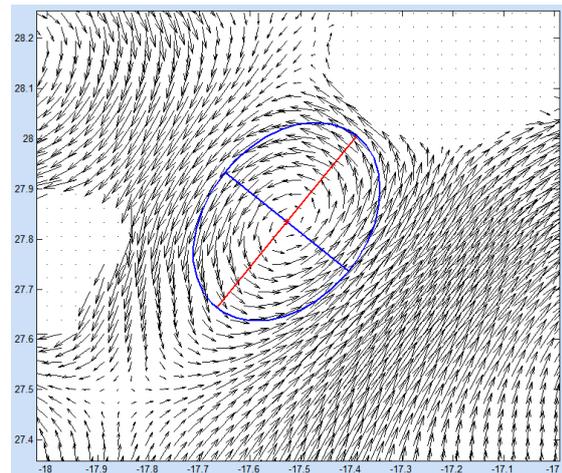
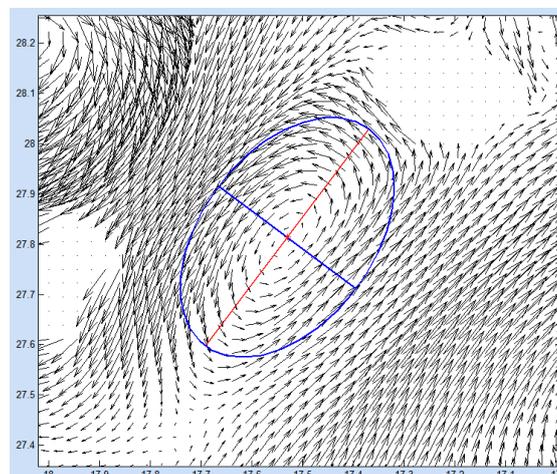


Figura 4.3.1.7

Superficie a profundidad 30

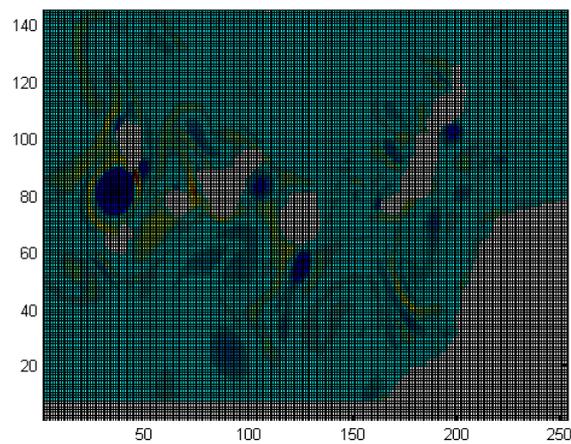


*Figura 4.3.1.8**Superficie a profundidad 10 interpolada*

4.3.2. CARACTERIZACIÓN AUTOMÁTICA DE GIROS

En este apartado se describe tanto el diseño del método de detección de centros como los dos métodos de estimación de la forma que finalmente se han seleccionado.

Para la detección de los centros de los giros se ha optado por el análisis de la curvatura del campo vectorial basada en el operador rotacional (ver figura 4.3.2.1).

*Figura 4.3.2.1**Superficie rotacional generada a partir del mapa de corrientes.*

Para la segunda parte, la estimación de la forma de los giros, se han desarrollado dos métodos, uno basado también en el rotacional y otro que se basa en el ajuste de una elipse a la forma del campo vectorial que rodea el centro de un giro (ver un ejemplo de resultado en la figura 4.3.2.2).

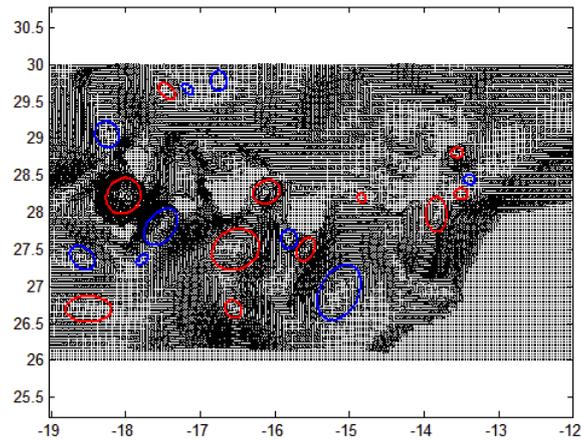


Figura 4.3.2.2

Resultado de la estimación de la forma en un mapa por el método de ajuste de elipses al campo vectorial.

4.3.2.1. DETECCIÓN DE LOS CENTROS DE LOS GIROS

El primer paso para la detección de los centros de los giros es obtener los máximos y mínimos locales de la superficie generada con el operador rotacional (ver figura 4.3.2.3), dado que, si existen giros, su centro estará cercano a estos máximos/mínimos. En la figura 4.3.2.4 se muestran ejemplos de la correspondencia entre el rotacional y las corrientes.

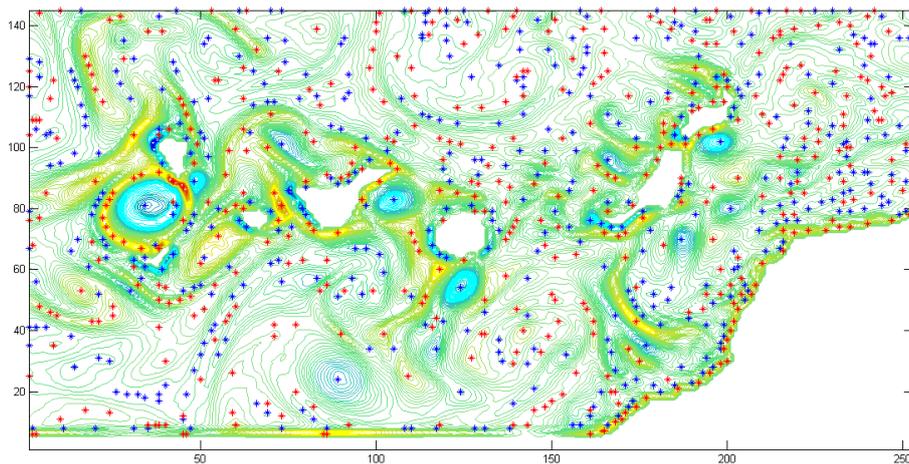


Figura 4.3.2.3

Contornos de la superficie del rotacional generada mostrando los máximos en rojo y los mínimos en azul.

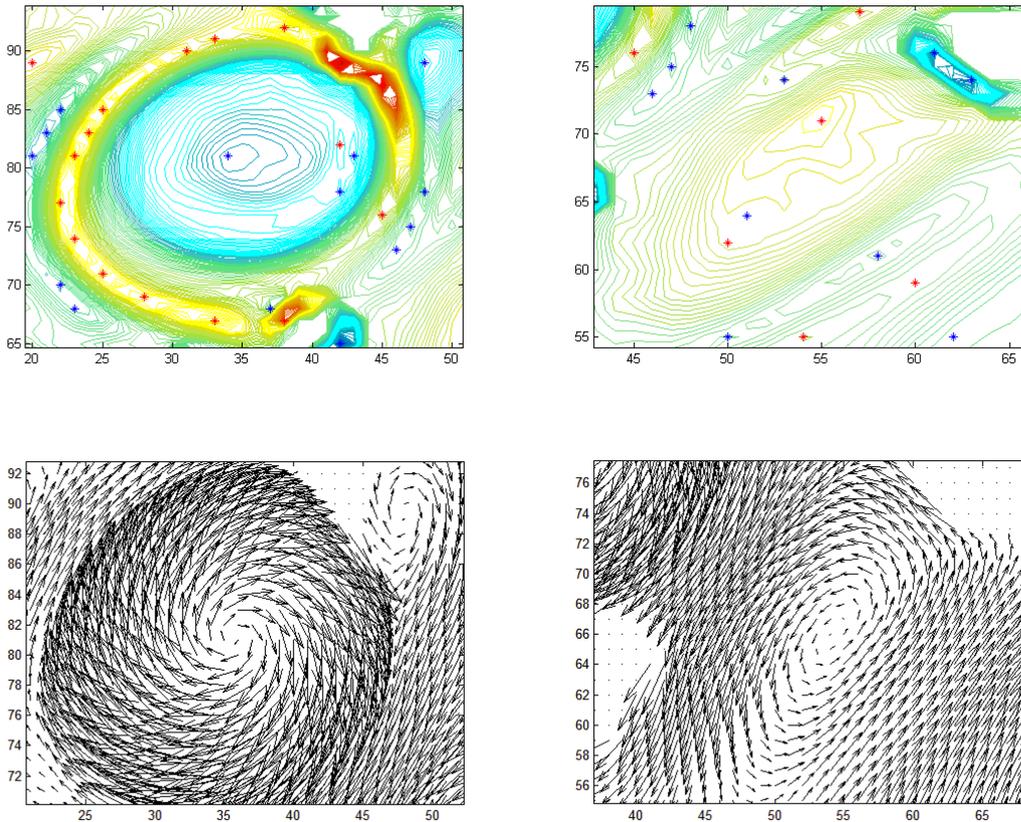


Figura 4.3.2.4

Contornos del rotacional y sus respectivos campos vectoriales de corriente.

Después, desde cada máximo/mínimo local del rotacional se busca un mínimo de corriente cercano siguiendo la tendencia decreciente de la magnitud de corriente desde el punto actual, tal y como se ilustra en la figura 4.3.2.5. Cada extremo local tendrá un mínimo de corriente asociado, aunque pueden estar duplicados, es decir, un mismo mínimo de corriente puede tener varios máximos/mínimos locales del rotacional asociados. Esta anomalía se soluciona en una etapa posterior.

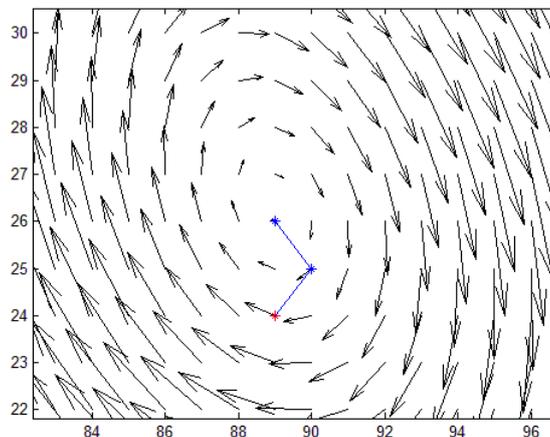


Figura 4.3.2.5

Ejemplo de la búsqueda de mínimo local de corriente desde un max/min local del rotacional.

Tras obtener estos mínimos de la magnitud de corriente, se considera a los mismos potenciales centros de giro, y sobre ellos se aplican una serie de restricciones para dirimir si realmente lo son en cada caso. La comprobación de las restricciones se hace usando la información que proporcionan los vectores que coincidan con los límites de un área cuadrada alrededor del potencial centro del giro, que denominaremos cuadrante, y cuyos lados se etiquetan con sus correspondientes puntos cardinales norte, sur, este y oeste (ver figura 4.3.2.6). En un proceso iterativo se van modificando sus dimensiones de forma creciente hasta que se llegue a un tamaño del cuadrante para el que se cumplan todas las restricciones, o bien se llegue al límite de tamaño de área establecido por el usuario y se considere que la región analizada no se corresponde con un giro.

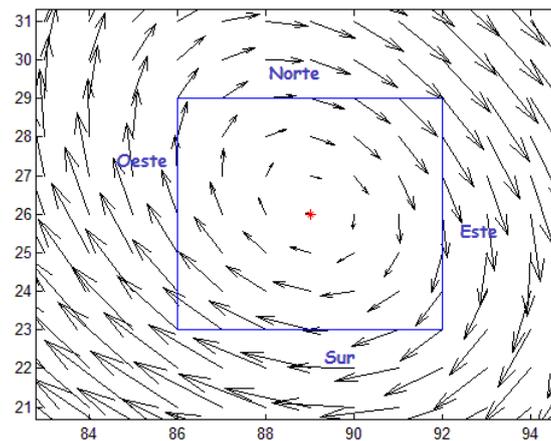


Figura 4.3.2.6

Denominación geográfica de los cuatro límites del cuadrante.

Primera Restricción

Se ha de cumplir que alrededor del centro de un giro la corriente tienda a ser cerrada. Para ello se obtendrán cuatro vectores representativos para cada lado del cuadrante, como se muestra en el ejemplo de la figura 4.3.2.7.

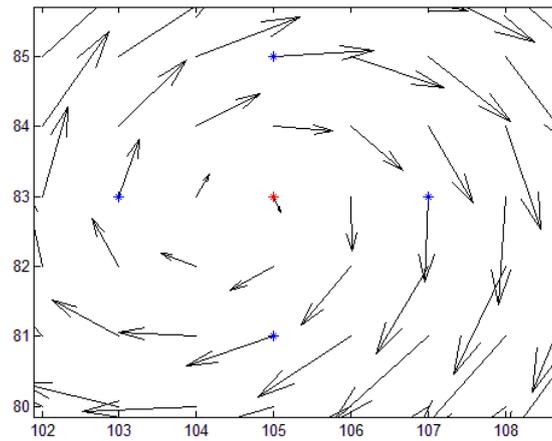


Figura 4.3.2.7

Los cuatro vectores representativos de un giro.

Solamente se aceptarán como potenciales centros de giro en esta fase los puntos cuyos vectores de corriente representativos cumplan las siguientes condiciones:

1. La componente horizontal del vector representativo del lado norte es positiva
2. La componente horizontal del vector representativo del lado sur es negativa
3. La componente vertical del vector representativo del lado este es negativa
4. La componente vertical del vector representativo del lado oeste es positiva

También se aceptarán los giros con el sentido contrario al de las condiciones, es decir cambiando la palabra “positiva” por “negativa” y viceversa.

En la figura 4.3.2.8 se muestra un ejemplo de un candidato a centro de giro que no cumple la primera restricción.

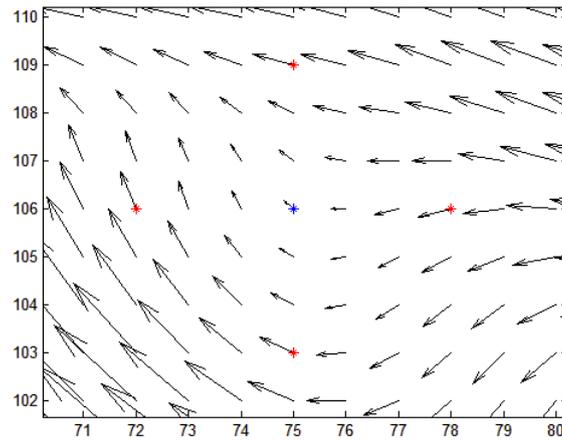


Figura 4.3.2.8

Candidato a centro de giro no aceptado al no cumplir la primera restricción.

Sin embargo con el cumplimiento de esta restricción no se asegura que en la región en estudio se encuentre un giro, tal y como se ilustra en la figura 4.3.2.9.

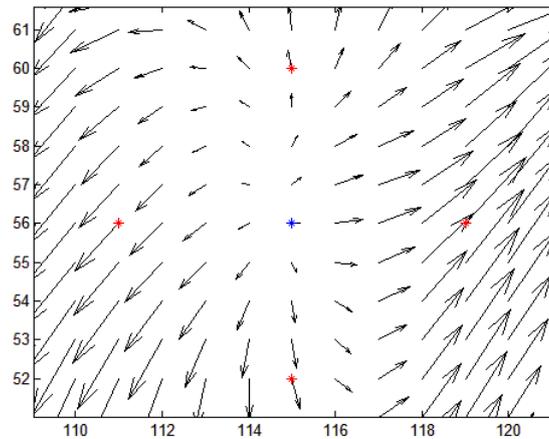


Figura 4.3.2.9

Candidato a centro de giro que cumple la primera restricción.

Segunda Restricción

La segunda restricción está pensada para eliminar de la lista de potenciales giros los que tienen la forma del de la imagen anterior. Para ello se comprueba el ángulo del vector de corriente representativo de cada uno de los límites del cuadrante. Sólo cumplirán la segunda restricción aquellos vectores que estén dentro del rango:

- $[-45^\circ, 45^\circ]$ o $[135^\circ, 225^\circ]$ para los vectores Norte y Sur.

- $[45^\circ, 135^\circ]$ o $[225^\circ, 315^\circ]$ para los vectores Este y Oeste.

En la figura 4.3.2.10 se muestran ejemplos de vectores que verifican esta restricción.

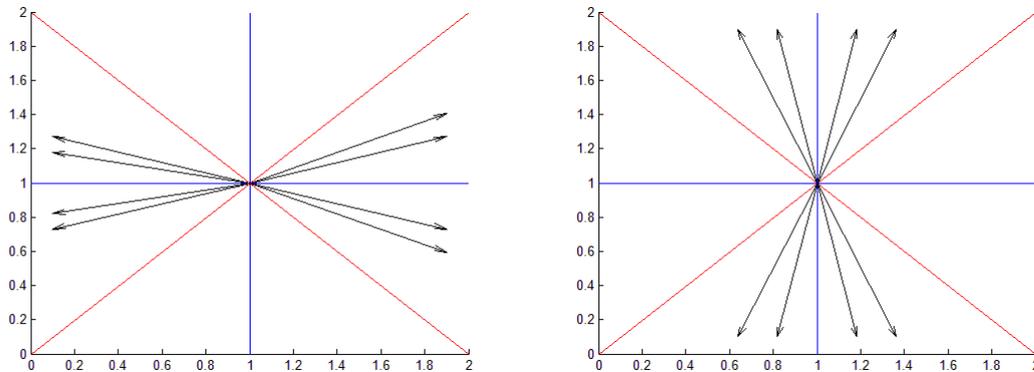


Figura 4.3.2.10

Ejemplo posibles vectores en los límites Norte y Sur del cuadrante y posibles vectores en los límites Este y Oeste.

Para que el punto se siga considerando un potencial centro de giro, tres de sus cuatro vectores representativos tienen que cumplir esta condición. No es necesario que los cuatro la tengan que cumplir ya que se ha visto que es una condición demasiado restrictiva y su cumplimiento hace que no se consideren como giros algunos que visualmente se puede ver que sí lo son.

La segunda restricción incluye a la primera, sin embargo es mucho más costosa, ya que hay que calcular el ángulo de los vectores de corriente. Esta es la razón por la que los potenciales centros de giro tienen que superar la primera restricción antes de hallar su ángulo y comprobar la segunda restricción.

Tercera Restricción

Una vez superadas las dos restricciones anteriores, existen grandes posibilidades de que el punto analizado sea realmente un centro de giro. Sin embargo, hay que tener en cuenta que solamente se han comprobado los cuatro vectores representativos de cada límite del cuadrante, con lo que no se puede asegurar que se dé una circulación cerrada. La tercera restricción comprueba que todos los vectores de corriente en los límites del cuadrante tengan un sentido coherente y constante de rotación alrededor del centro, tal y como se muestra en la figura 4.3.2.11.

Para aplicar la tercera restricción se van seleccionando parejas consecutivas de vectores en sentido contrario a las agujas del reloj y se comprueban sus ángulos. El ángulo entre los dos vectores no debe ser superior a 72° y siempre debe aumentar respecto a la pareja anterior. Sin embargo se admite que el ángulo pueda disminuir una cantidad no mayor de 5° .

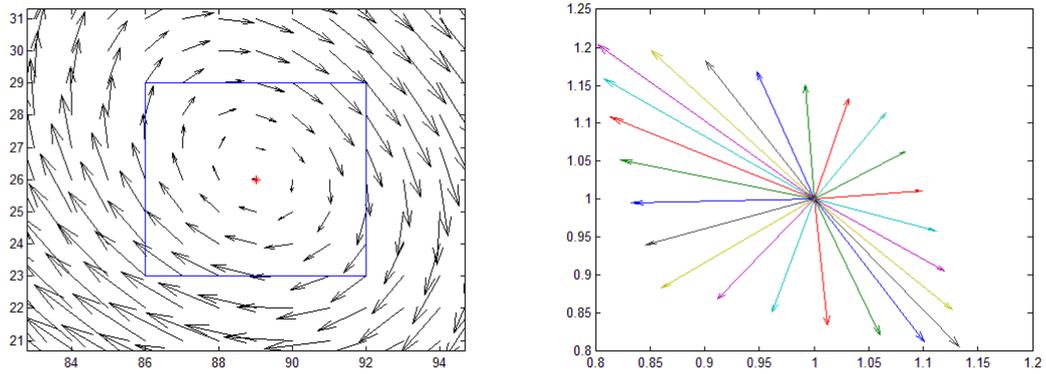


Figura 4.3.2.11

Vectores coincidentes con el límite del área. Se puede observar que su sentido de la rotación es constante.

Al pasar todas las restricciones explicadas anteriormente se averigua también si se trata de un giro ciclónico o anticiclónico. Si el sentido de la rotación no coincide con su máximo o mínimo del rotacional asociado (los ciclónicos generan máximos del rotacional y los anticiclónicos mínimos), se desecha el centro del giro, ya que en el paso anterior se ha errado en la búsqueda de un mínimo de corriente a partir del max/min local.

Llegados a este punto, se dispone de una serie de centros de giro, con un máximo/mínimo local del rotacional asociado. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, un mismo centro de giro puede estar asociado a varios extremos locales, tal y como se muestra en las figuras 4.3.2.12.

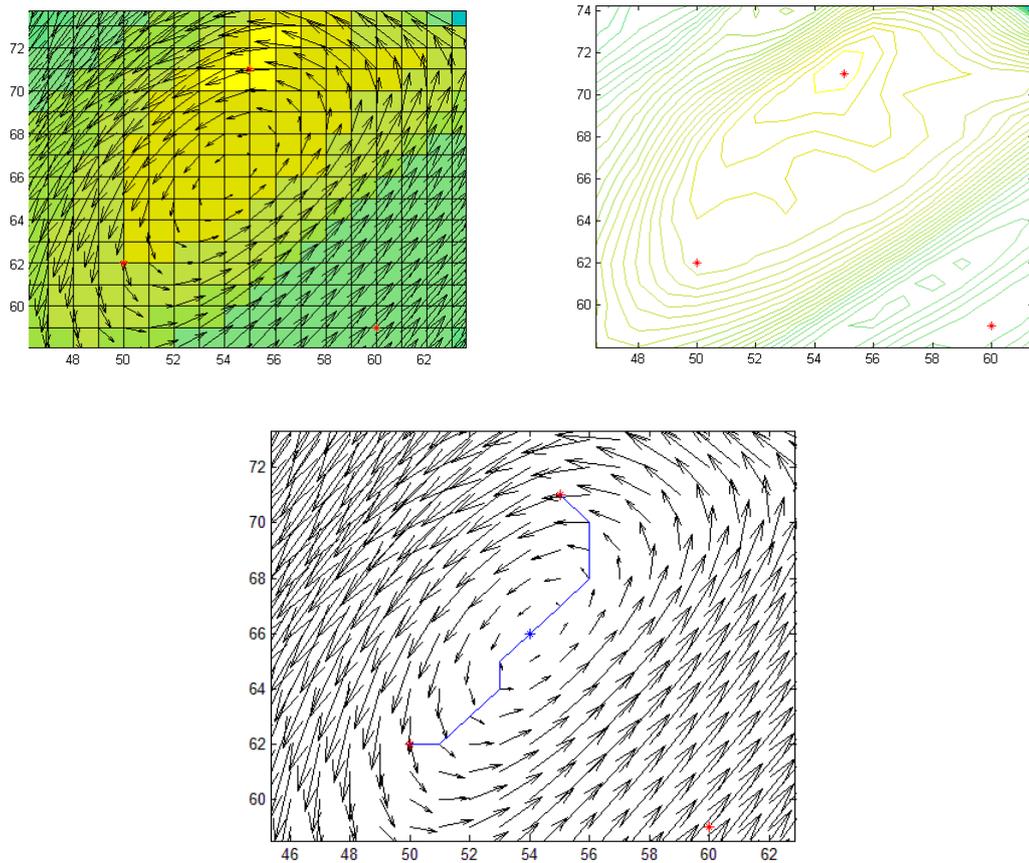


Figura 4.3.2.12

Ejemplo de dos max/min del rotacional a partir de los cuales el procedimiento recursivo encuentra el mismo punto con mínima magnitud de corriente.

En casos como los que se han mostrado hay que decidir cuál de los máximos/mínimos locales del rotacional es el que mejor se ajusta al centro del giro a la hora de estimar la forma por el método del rotacional, ya que en la mayoría de las ocasiones el extremo del rotacional se ve desplazado con respecto al centro real del giro debido a la forma no simétrica del mismo. Esta circunstancia ocurre porque las áreas de max/min se desplazan hacia las zonas de corriente de más magnitud, como se puede apreciar en las figuras 4.3.2.13 y 4.3.2.14.

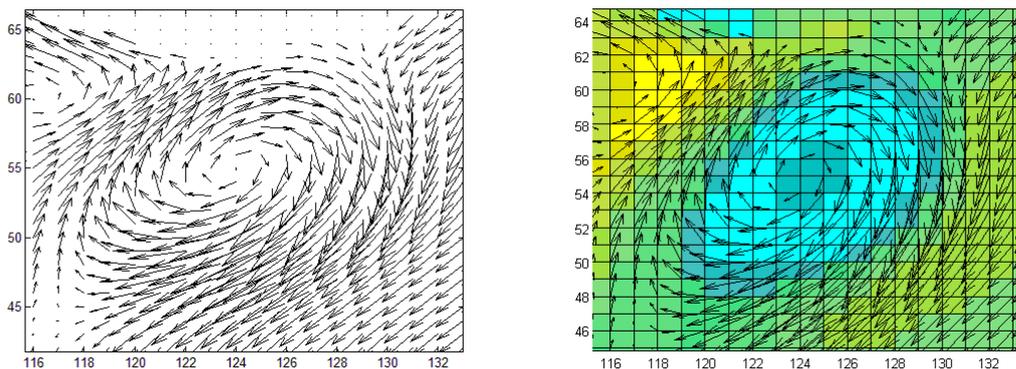


Figura 4.3.2.13

Se puede apreciar cómo el mínimo local del rotacional coincide con el centro del giro

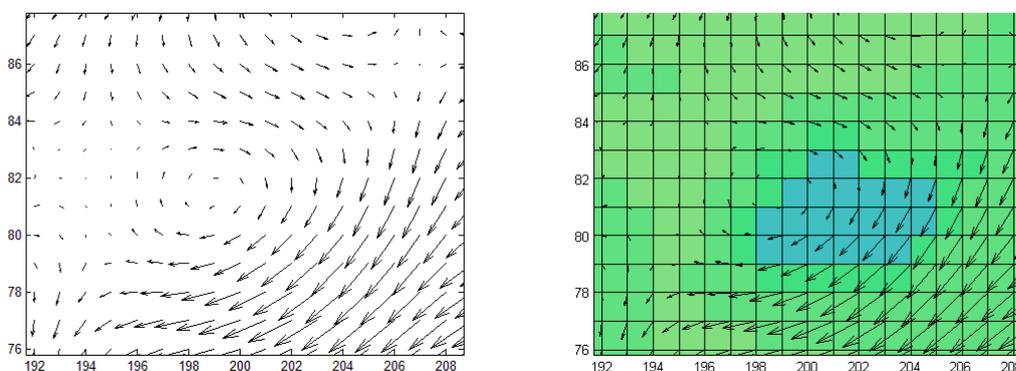


Figura 4.3.2.14

Se puede ver cómo al contrario de las imágenes anteriores el mínimo local del rotacional está desplazado hacia la zona con una magnitud de corriente superior.

Para asignar un máximo/mínimo local del rotacional a un centro de giro se usa una heurística que contiene como factores los siguientes:

- La distancia euclídea del centro del giro a los max/min del rotacional (modificando su importancia en la heurística teniendo en cuenta las dimensiones del mapa de corrientes).
- La diferencia entre el valor del rotacional del extremo local que se quiere asignar, y la magnitud mínima o máxima (según se trate un giro ciclónico o anticiclónico) entre todos los max/min locales del rotacional asociados al mismo centro de giro.

La expresión de la heurística es la siguiente:

$$H_i = \frac{K_1 D_i}{F} + K_2 |V_{max/min} - V_i|$$

donde D_i es la distancia euclídea de cada max/min del rotacional asociado con un mínimo de corriente a dicho mínimo de corriente. F es un factor de tamaño dado por:

$$F = \frac{lon_{size} + lat_{size}}{2}$$

$V_{max/min}$ es el valor máximo o mínimo de los valores de los máximos o mínimos locales del rotacional asociados al mismo centro de giro, según sea ciclónico o anticiclónico (máximo para los ciclónicos y mínimo para los anticiclónicos).

$$V_{max/min} = \max/\min (V_i)$$

V_i es cada uno de los valores de los puntos máximos o mínimos locales del rotacional. K_1 y K_2 son dos constantes cuyo valor asignado basado en pruebas es de:

$$K_1 = 100$$

$$K_2 = 40$$

El max/min local del rotacional que genere un menor valor de la heurística será el que se asignará al centro del giro.

4.3.2.2. ESTIMACIÓN DE LA FORMA POR EL MÉTODO DEL ROTACIONAL

Para estimar la forma de cada giro mediante este método, se usa la superficie del rotacional generada para el mapa de corrientes y la ubicación de los máximos y mínimos locales asociados a cada centro del giro anteriormente detectado.

La idea es, para cada giro detectado, hallar los valores del rotacional donde la pendiente de la superficie alrededor del max/min local del rotacional en valor absoluto asociado al centro de giro comienza a dejar de aumentar (puntos de inflexión, ver gráficas de la figura 4.3.2.15).

Mediante el uso de estos puntos de inflexión, se obtendrá un umbral que limite un área alrededor del centro de giro para definir la forma del mismo, tal y como se ilustra en la figura 4.3.2.16.

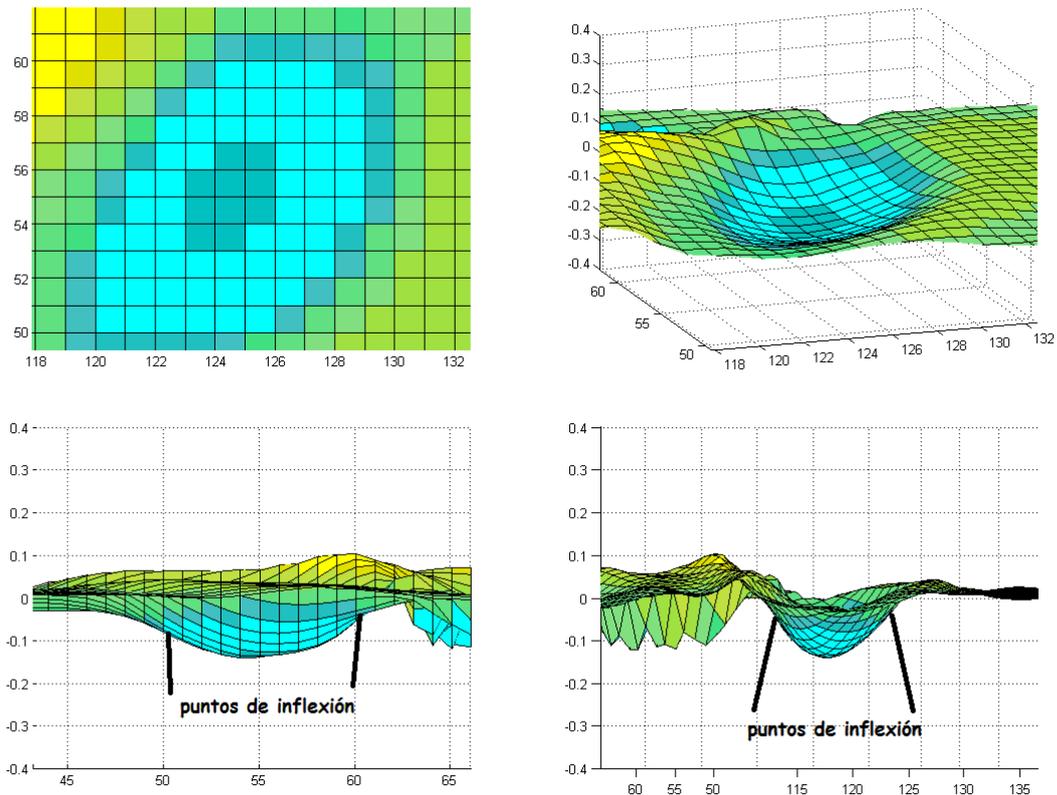


Figura 4.3.2.15

Imágenes de un giro mostrando la curva que se genera y parte de los puntos de inflexión de la misma.

Debido a que en una superficie en 3D se obtienen varios puntos de inflexión, hay que elegir el valor de uno de ellos como umbral. En este caso se selecciona el punto de inflexión con valor del rotacional máximo o mínimo (máximo si es un giro ciclónico y mínimo si es anticiclónico). Se elige este valor porque no se puede asegurar que eligiendo otro o la media de los encontrados como umbral, se pueda llegar a él a la hora de estimar la forma.

Con el valor del punto de inflexión elegido como umbral, para cada giro, simplemente se buscan por medio de un algoritmo de inundación las posiciones del mapa en las que el valor del rotacional llega o sobrepasa (por debajo o por encima) el umbral. En la figura 4.3.2.16 se puede ver un ejemplo de estimación del contorno del giro obtenido con este método.

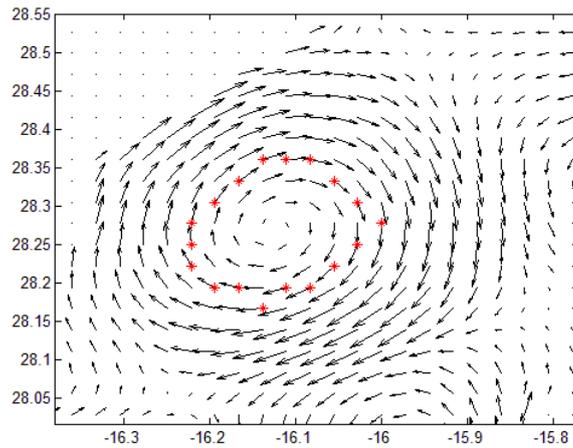


Figura 4.3.2.16

Ejemplo de un contorno de un giro estimado por medio del método del rotacional.

4.3.2.3. ESTIMACIÓN DE LA FORMA POR EL MÉTODO DE AJUSTE DE ELIPSES

En esta sección se describe un nuevo método basado únicamente en el campo vectorial sin utilizar el operador rotacional. Este método finalmente fue considerado el mejor de todos ya que sus resultados fueron lo suficientemente aceptables, tal y como se demostrará a continuación en el capítulo de pruebas).

El objetivo del método es la obtención de la elipse que mejor represente al giro en cuestión. Claramente los giros pueden tomar formas mucho más diversas que las que puede proporcionar la utilización de una elipse, como oválicas u ovoidales, e incluso más complejas aún. Sin embargo la utilización de elipses simplifica el proceso a costa de introducir errores de modelado que pueden considerarse asumibles. Además hace posible una más sencilla comparación con el marcado manual.

El método tal y como está pensado se divide en tres fases: estimación de la orientación, estimación de la forma y estimación del tamaño.

Estimación de la Orientación

El objetivo de esta fase es obtener la orientación del giro, es decir, su ángulo respecto a la horizontal. En esta fase se hallará también la posición de sus ejes iniciales, los cuales serán ambos del mismo tamaño.

Para obtener el resultado se utilizó una heurística basada en la ortogonalidad de los vectores de corriente que rodean el centro del giro previamente detectado. La orientación del giro será aquella en la que los vectores de corriente más cercanos a las posiciones de los extremos de sus dos ejes tengan un error medio menor, que será el ángulo medio que forma cada uno de los cuatro vectores de corriente, con un vector

ortogonal al vector que une el centro del giro con la posición del vector de corriente cuyo ángulo se quiere medir. Esto se ilustra en la figura 4.3.2.17.

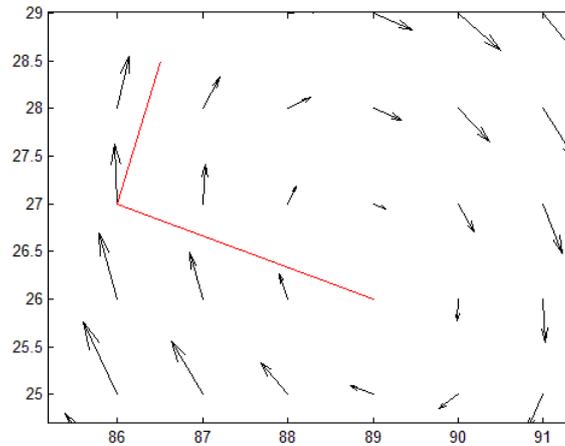


Figura 4.3.2.17

Ángulo que forma el vector de corriente con el vector ortogonal al vector que une el centro del giro con la posición inicial del vector de corriente. En este caso será un ángulo de 21.5198° .

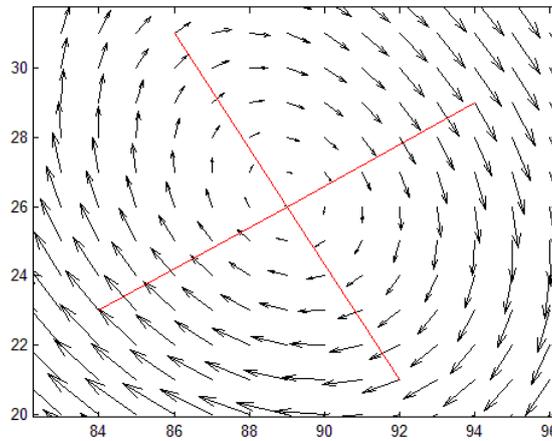


Figura 4.3.2.18

Solución para el giro situado en el punto [89,26]. Son los cuatro vectores encontrados más cercanos a los extremos de los dos ejes cuyo error angular medio es mínimo.

Para lograr la solución mostrada en la figura 4.3.2.18, primero hay que definir los ejes e irlos rotando progresivamente con un cierto incremento angular hasta llegar a una rotación de 90° , tal y como se ilustra en la figura 4.3.2.19.

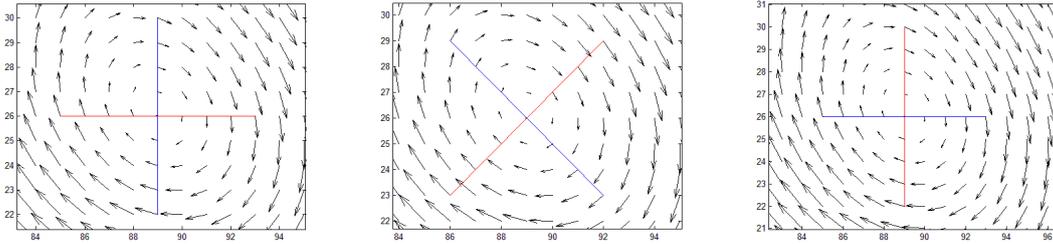


Figura 4.3.2.19

En estas imágenes se aprecia como es suficiente rotar 90° grados los ejes para llegar a pasar por todas las orientaciones posibles con el incremento angular considerado.

Además de la rotación, la estimación de la orientación incluye también un escalado progresivo. El procedimiento es el siguiente: se va modificando el tamaño de los ejes de menor a mayor hasta alcanzar un tope definido. Para cada tamaño de los mismos, se rotan los ejes 9° en cada iteración y se mide su error angular como anteriormente se explicó. Al final de todas las combinaciones de tamaños y orientaciones, se obtiene el tamaño y orientación de los ejes para los que el error medio ha sido mínimo.

Estimación de la Forma

Una vez obtenida la orientación de los ejes con respecto al centro del giro, lo siguiente es estimar su forma intentando adaptar una elipse a los vectores que rodean al centro del giro. Inicialmente al entrar en esta fase, al ser los ejes del mismo tamaño la elipse es un círculo. Por lo tanto habrá que disminuir uno de los dos ejes hasta encontrar la elipse resultado (ver figura 4.3.2.20). También se podría optar por aumentar el tamaño de uno de los ejes, pero se observó que se corría el riesgo de salirse del giro obteniendo un resultado erróneo.

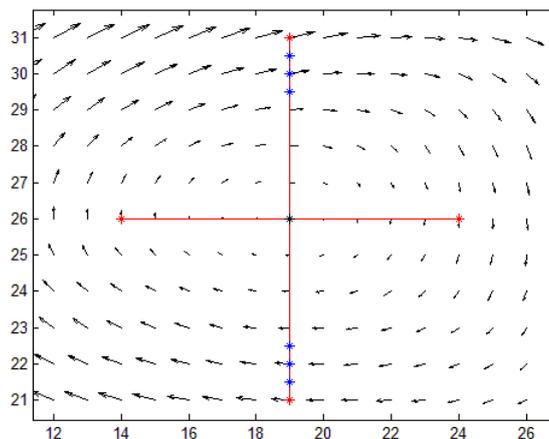


Figura 4.3.2.20

Ejemplo de cómo se iría reduciendo uno de los ejes, deformando el círculo para encontrar la elipse que mejor se ajuste al campo vectorial alrededor del centro del giro.

La forma que se ideó para saber cómo de buena es una elipse para un giro determinado, es ir obteniendo el error medio comparando el ángulo de los vectores de dirección de la elipse en cada punto, con los ángulos de los vectores del campo vectorial más cercanos (ver un ejemplo en figuras 4.3.2.21 y 4.3.2.22). De esta manera se obtiene la elipse que mejor se adapte a la forma del campo vectorial alrededor del centro del giro.

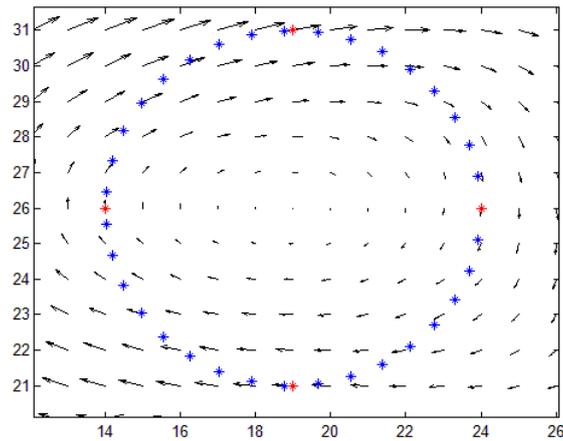


Figura 4.3.2.21

Ejemplo de puntos de una elipse.

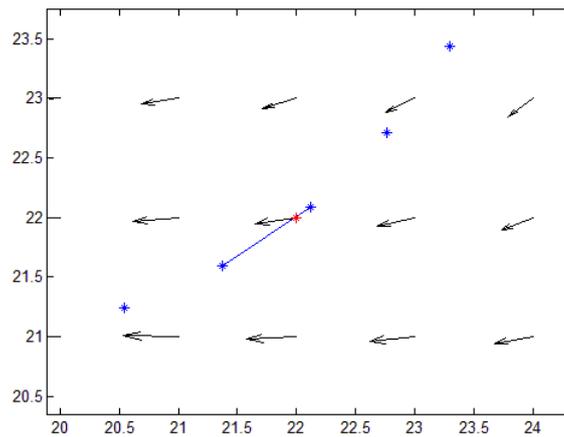


Figura 4.3.2.22

Ejemplo de comparación de los vectores de dirección de la elipse y los vectores del campo vectorial del mapa más cercanos. En este caso el ángulo del vector de dirección de la elipse es 236.5723° y el ángulo del vector del mapa 188.9726° . Por lo tanto el error es de 47.5997° . Este error se calcularía para cada punto de la elipse con su

respectivo vector en el mapa. Posteriormente se calcularía también la media de los errores hallados.

El eje se irá reduciendo progresivamente y midiendo el error medio hasta que dicho error sea mayor que el error obtenido en la elipse de la iteración anterior, es decir, hasta obtener una elipse que se adapte peor que la anterior al campo vectorial que rodea el centro del giro. Este proceso se ilustra en la figura 4.3.2.23 y en la tabla 4.3.2.1.

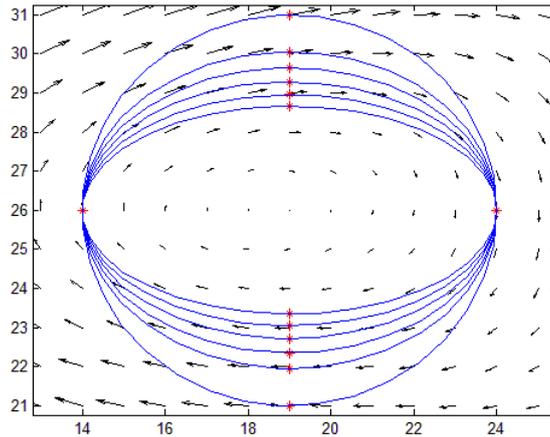


Figura 4.3.2.23

Ejemplo reducción de eje con las elipses que se generarían. El eje se reduce siempre un 10%.

Elipse	Error medio grados
1	18.7128
2	12.3014
3	9.6773
4	7.6375
5	7.1104
6	8.7777

Tabla 4.3.2.1

Se ve cómo en la última elipse se genera un error medio superior a la anterior. Por lo tanto la solución es la penúltima elipse generada.

La cuestión es: ¿qué eje elegir para ir reduciendo? Inicialmente se reducen ambos ejes y se mide el error que genera esa reducción. El eje cuyo error generado sea el mínimo de los dos, será el escogido para ser reducido a partir de ese momento, tal y como se muestra en la figura 4.3.2.24.

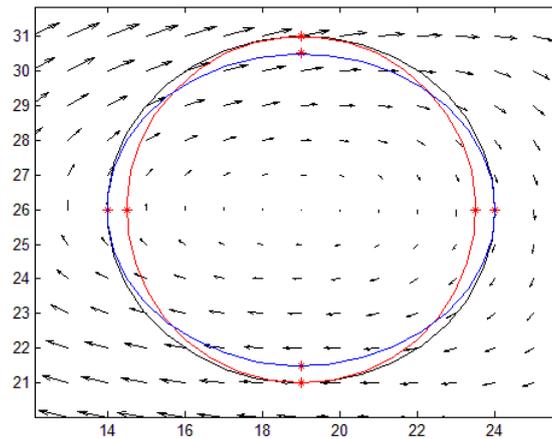


Figura 4.3.2.24

En negro la elipse inicial, en rojo la elipse errónea y en azul la adecuada. Se comparan los errores de la elipse azul y la roja y se elige finalmente reducir el eje vertical, ya que como se puede apreciar, la elipse se adapta de esta forma mejor al campo vectorial.

Estimación del Tamaño

Para estimar el tamaño del giro se decidió combinar algunos conceptos de la estimación de la forma con la segunda y tercera restricción del método de detección de los giros.

Teniendo la orientación y la forma del giro, es decir, su ángulo y sus dos radios, éstos se van expandiendo, duplicándose en cada expansión (con las mismas proporciones radiales) hasta obtener una elipse para la que los vectores del campo vectorial más cercanos a sus puntos, no cumplan la segunda y tercera restricciones del método de detección. La diferencia es que las restricciones se aplican sobre la forma de la elipse en vez de sobre un cuadrado, como se hacía en el método de detección.

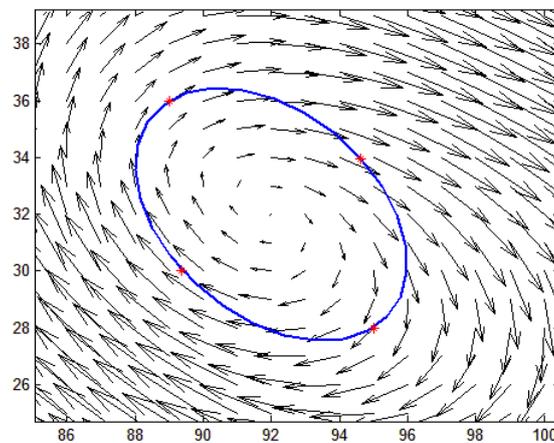


Figura 4.3.2.25

Se aplica la segunda restricción sobre los vectores del campo más cercanos a los extremos de los ejes.

Por supuesto la segunda restricción se adapta a la orientación de la elipse para comprobar sus cuatro ángulos representativos, en vez de medirse respecto a la horizontal (ver figura 4.3.2.25). Para la tercera restricción no es necesario tener en cuenta la orientación de la elipse, dado que está relacionada con el campo vectorial circundante. Por lo tanto, la orientación de la elipse es irrelevante (ver figura 4.3.2.26).

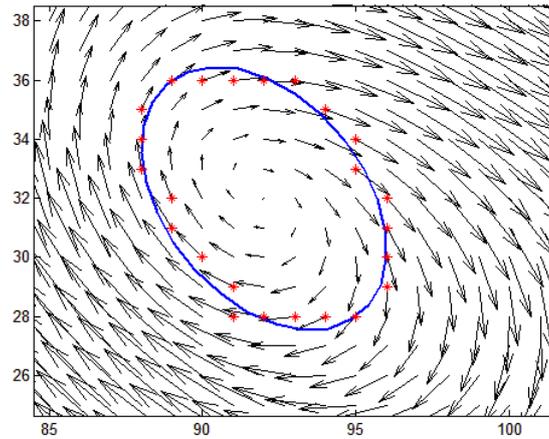


Figura 4.3.2.26

Ejemplo: puntos en los que se aplicaría la tercera restricción.

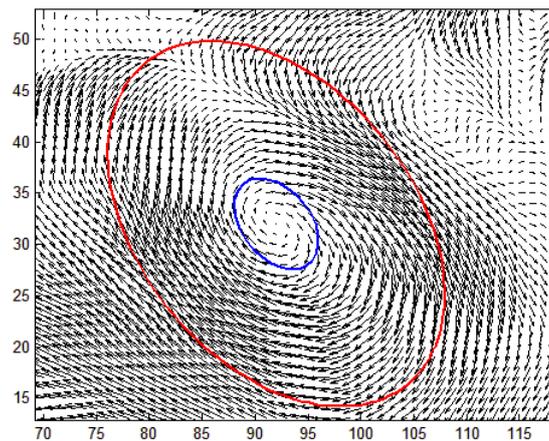


Figura 4.3.2.27

Elipse inicial y la primera elipse encontrada al expandir los ejes que no cumple ninguna de las dos últimas restricciones del método de detección.

Tras encontrar esta primera elipse incorrecta en la expansión (ver figura 4.3.2.27) se sigue el proceso inverso, es decir, se van reduciendo ambos ejes desde la primera elipse incorrecta en la expansión hasta encontrar una que cumpla las restricciones, la primera elipse correcta en la reducción.

La razón de hacerlo de esta manera es reducir el conjunto de búsqueda, ya que la primera elipse correcta en la reducción se busca en un rango axial que va desde la primera elipse incorrecta en la expansión hasta la anterior (también en el proceso de expansión), que inevitablemente será correcta. Los ejes se reducirán una cantidad dada por la diferencia axial entre la primera elipse incorrecta en la expansión y la primera elipse correcta en la reducción.

En la figura 4.3.2.28 se muestra un ejemplo del procedimiento de expansión y reducción.

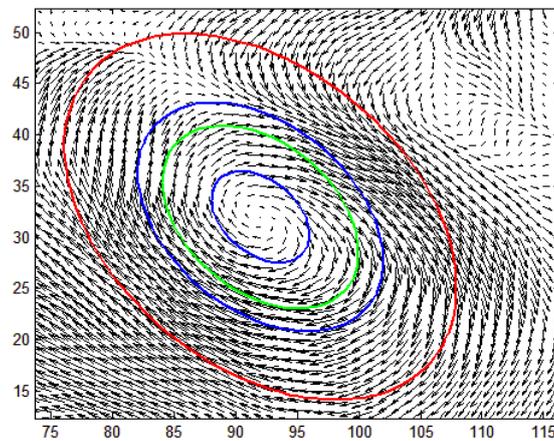


Figura 4.3.2.28

En rojo, la primera elipse encontrada que no cumple las restricciones en el proceso de expansión. En verde, la última elipse que cumplió las restricciones en el proceso de expansión. En azul, la elipse inicial y la final, que es la primera elipse encontrada que cumple las restricciones en el proceso de reducción realizado desde la elipse roja.

Tras obtener una elipse que cumpla las restricciones, se aplica sobre sus ejes de nuevo el método de estimación de forma, ya que al cambiar su tamaño, su forma en algunas ocasiones puede llegar a variar. Podemos ver un ejemplo de esto en la figura 4.3.2.29.

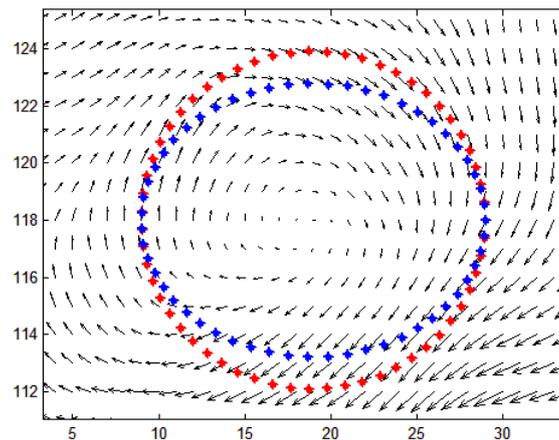


Figura 4.3.2.29

En rojo, elipse resultado de la estimación del tamaño. En azul, elipse que resulta de la nueva estimación de la forma. Se aprecia una mejora cualitativa en el resultado.

4.3.3. MÉTODO DE COMPARACIÓN

En este apartado se explica el diseño del método de comparación o verificación de los resultados de las formas de caracterización de giros desarrolladas, que, recordemos, han sido dos: el método basado en el rotacional y el método basado en el ajuste de elipses al campo vectorial. En ambos casos se utiliza el método de detección de centros de giros basado en el rotacional.

El objetivo de la comparación es dar al usuario una certeza de que el método de detección es fiable, y proporcionarle una completa información sobre los errores cometidos tanto en la detección de centros como en la estimación de la forma de los giros.

El método de comparación está diseñado desde el punto de vista de que el primer conjunto de datos de giros es el conjunto considerado más correcto y el segundo conjunto es el considerado menos correcto. Por otro lado, se aplica a un mapa entero en un instante de tiempo determinado y a una profundidad dada.

4.3.3.1. INDICADORES DE LA DETECCIÓN DE CENTROS

Para comparar la detección de centros entre la caracterización manual y otro método se utilizan 3 indicadores (ver un ejemplo en la figura 4.3.3.1):

- Match: Indica el número de giros detectados que coinciden en ambos conjuntos.
- Eddy Found Ratio: Se trata del porcentaje de giros del primer conjunto de datos que han sido encontrados en el segundo. Porcentaje de detección.

- **Eddy Excesss Ratio:** Porcentaje de giros del segundo conjunto que no coinciden con ninguno de los del primero. Por lo tanto se trata de un porcentaje de sobredetección.

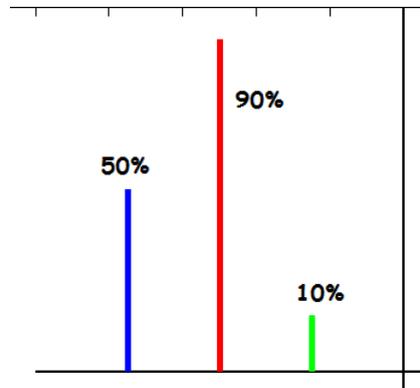


Figura 4.3.3.1

En este ejemplo se puede ver como el “eddy found ratio” (en azul) es aproximadamente del 50%, lo cual indica que la mitad de los giros establecidos en el primer conjunto han sido detectados en el segundo. El “eddy excess ratio” (en rojo) es aproximadamente del 90%, por lo tanto solo un 10% de los giros del segundo conjunto están en el primero. Por último se establece el tanto por ciento de la suma del número de giros de los conjuntos que son coincidentes. Una representación relacionada con el indicador “match”.

4.3.3.2. INDICADORES DE LA ESTIMACIÓN DE LA FORMA

Estos datos intentan dar una idea de la diferencia entre la estimación de forma del primer conjunto con el segundo, es decir, el error del segundo conjunto suponiendo el primer conjunto como perfecto o como el más aceptable en cuanto a la estimación.

En este caso se han definido 7 indicadores. Los 5 primeros son indicadores de error entre elipses, por lo que tienen que ver exclusivamente con comparaciones entre la caracterización manual y la estimación de la forma por ajuste de elipses. En cambio los 2 últimos son comunes a ambos métodos de estimación de la forma, ya que se basan en comparar contornos.

Indicadores de diferencias entre elipses

A continuación se explican los indicadores relacionados exclusivamente con la comparación entre elipses:

Radius Proportions Error: Indica el error (diferencia) medio en valor absoluto de las proporciones entre el radio mayor y el radio menor de cada elipse estimada correspondiente al mismo giro en ambos conjuntos. En realidad es un indicador que por sí solo, expresa poca información al usuario, ya que no existe un error tope de las

proporciones. Por lo tanto, para una mejor visualización, se utiliza cada media de las proporciones de cada conjunto para ser comparadas como se muestra en la figura 4.3.3.2. Otra alternativa es transformarlo en un valor porcentual, pero hay que descartar los giros excesivamente pequeños para que no se desvirtúe.

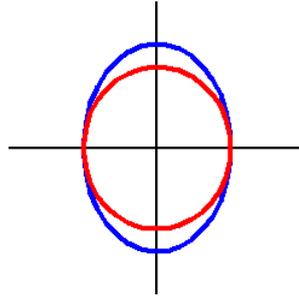


Figura 4.3.3.2

Vemos la diferencia entre las proporciones representada gráficamente. En este caso la diferencia es de 0.31137, que sin verlo gráficamente no expresa mucho.

Raw Angle Error: Indica la diferencia angular entre la media angular del primer conjunto y la media angular del segundo, suponiendo como ángulo el que forma el radio mayor con la horizontal (ver figura 4.3.3.3). En este caso sí existe un error máximo, que es de 90° .

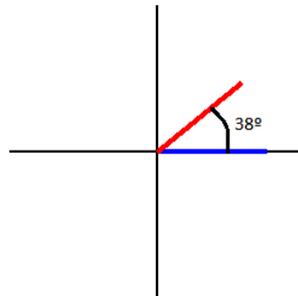


Figura 4.3.3.3

La diferencia angular en este caso es de 0.68 radianes. 38° aproximadamente.

A este indicador se le denomina “Raw”, porque no tiene en cuenta las proporciones de los radios. Por lo tanto a la hora de hacer la media, importa tanto el error angular de un círculo perfecto, como el de una elipse cuyo radio mayor tiene una longitud doble a la del radio menor.

En la figura 4.3.3.4 se muestra un ejemplo de la importancia del ángulo al cambiar la proporción de los radios.

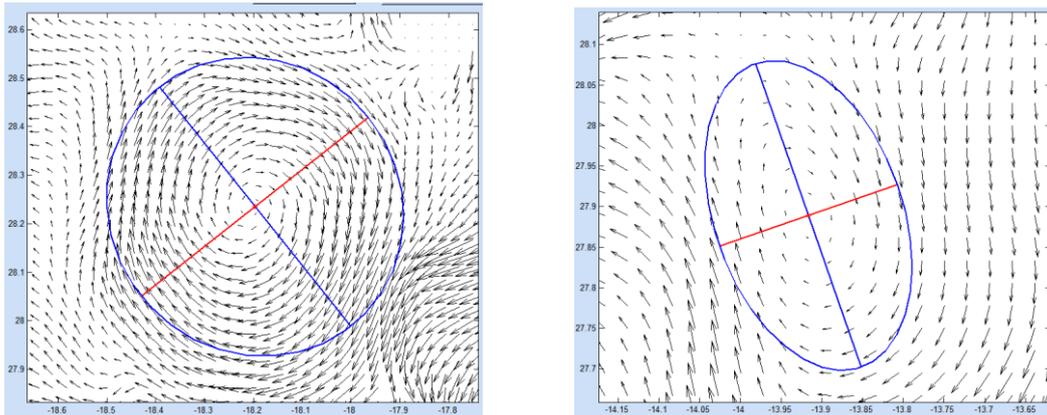


Figura 4.3.3.4

Ejemplo de una elipse en la que su ángulo proporciona poca información, y otra en la que sí es importante.

Por lo tanto, el dato, aunque indiscutiblemente objetivo, no se acerca a lo que visualmente se puede apreciar. Es decir, es un indicador que sobrestima el error.

Perceptual Angle Error: Indica el error angular medio en valor absoluto que se percibe. Es decir, soluciona la sobrestimación del error del apartado anterior. Tiene en cuenta las proporciones de los radios de las elipses a la hora de cuantificar su error angular.

Por encima de unas proporciones de los radios de 1.3 a 1, el error es igual que el “Raw Angle Error”, pero por debajo, la aportación del error disminuye linealmente hasta llegar a una aportación nula en el caso de que la elipse sea un círculo. Para la Figura 4.4.3.4, la primera imagen prácticamente no añadiría error, sin embargo, la segunda añadiría totalmente su error angular al error medio.

Size Error: Indica el error en el tamaño del giro. Simplemente es la diferencia en valor absoluto entre la media de los dos radios de cada elipse. Puede convertirse en un valor porcentual para hacerlo independiente del tamaño, pero descartando nuevamente los giros pequeños.

Global Error: Es la media de los tres errores más importantes: El error en las proporciones de los radios, el error angular perceptible y el error de dimensiones.

Indicadores de adaptación del contorno al campo

A continuación se explican los indicadores relacionados con la adaptación del contorno estimado del giro al campo vectorial circundante. Estos errores se calculan comparando los ángulos de los vectores directores de los contornos con los ángulos de los vectores del campo más cercanos. Esta forma de calcular el error se explicó anteriormente en el apartado de estimación de la forma de las elipses.

Manual error: Indica el error de ajuste medio de las elipses marcadas por el usuario.

Automatic error: Indica el error de ajuste medio del contorno automático estimado, se trate de elipses o de contornos hallados con el método basado en el rotacional.

Contour error: Diferencia entre los dos indicadores anteriores.

4.3.4. EDDY TRACKER

En este apartado se explicará el diseño de un sencillo sistema de seguimiento de giros (eddy tracker) que se ha desarrollado. La idea consiste en generar el mapa en el instante de tiempo en el que se empieza el seguimiento, mostrando la trayectoria vital temporal de los giros detectados en dicho instante de tiempo (ver figura 4.3.4.1).

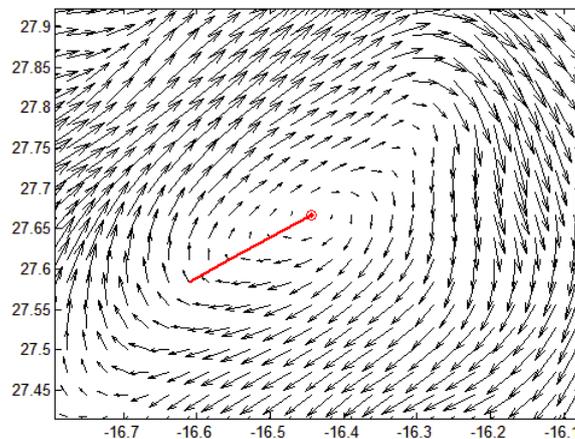


Figura 4.3.4.1

Ejemplo del seguimiento de un giro en el tiempo.

El primer paso es usar el método de detección de centros de giro en el instante de tiempo inicial. Así se obtiene la ubicación inicial de los giros cuyo tiempo de vida se quiere visualizar. Pueden verse más ejemplos de seguimiento en la figura 4.3.4.2.

Posteriormente, para cada instante de tiempo sucesivo, se halla el mínimo local de corriente (por el método recursivo explicado en el apartado del método de detección de centros), y sobre el punto encontrado, se aplican las tres restricciones. Esto se hace así para evitar volver a comprobar todos los candidatos a centro de giro y ganar en tiempo de respuesta. Si en el punto existe un centro de giro, se almacena, en caso contrario, se marca para tener la información de que en ese instante de tiempo el giro ha dejado de existir. Sin embargo, se sigue estudiando ese giro desaparecido, puesto que en muchas ocasiones hay periodos de tiempo en los que el giro puede llegar a desaparecer y sin embargo resurgir más adelante.

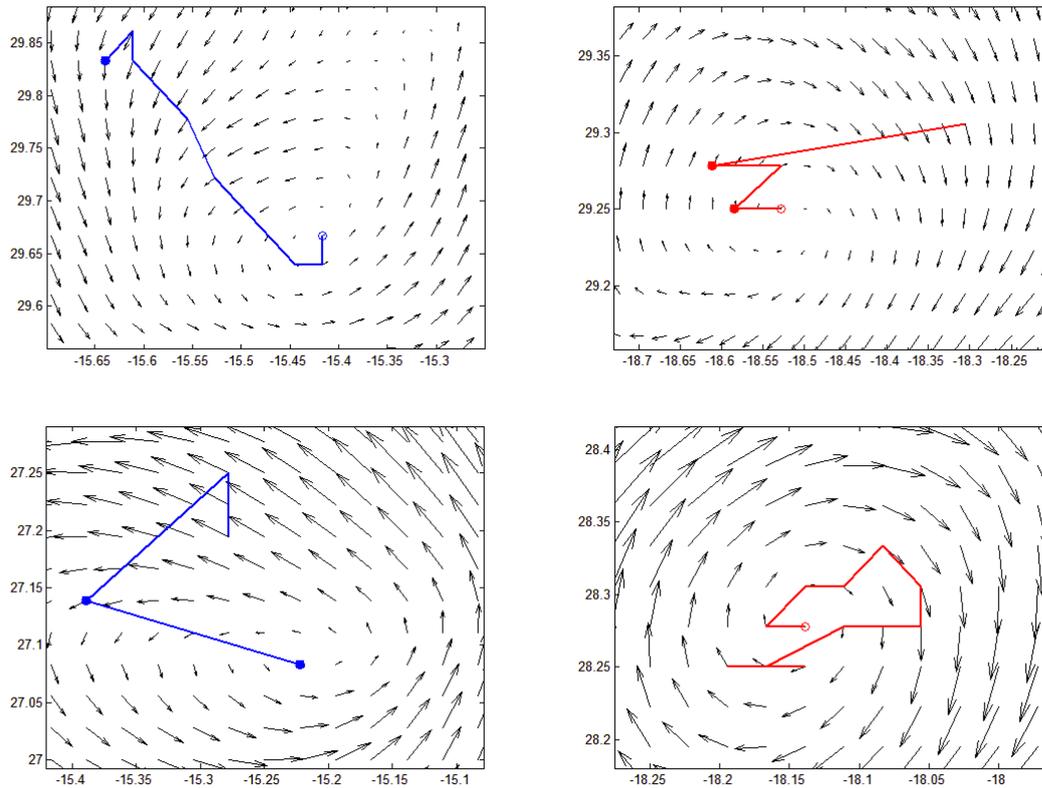


Figura 4.3.4.2

Ejemplos de seguimientos de giros en el tiempo.

4.4. DISEÑO DE LA INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO

En este apartado se explica el diseño de la interfaz gráfica de usuario relacionándolo con los casos de uso y los requisitos explicados en el capítulo de análisis. El aspecto general de la interfaz se muestra en la figura 4.4.1.

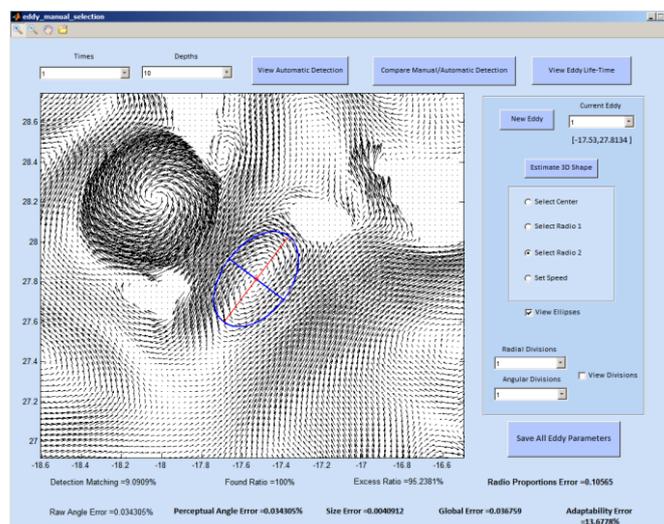
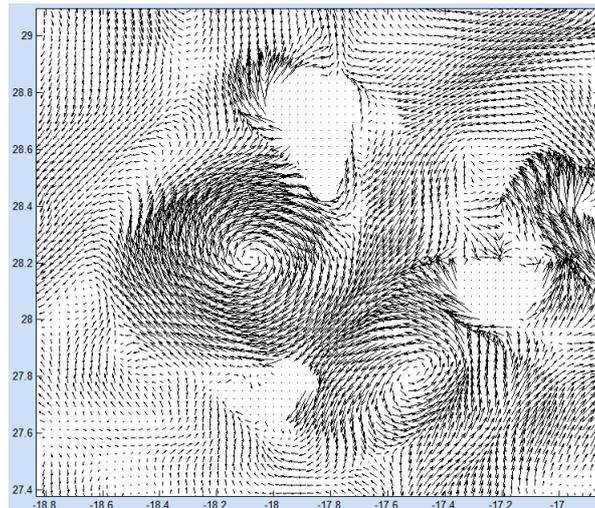


Figura 4.4.1

Aspecto general de la interfaz.

4.4.1. EJES

Los ejes constituyen la zona de la interfaz en la que se visualizan los mapas de predicción y sobre la que se realizan todas las acciones que se describen a continuación. En la figura 4.4.2 se muestra un ejemplo de visualización.

*Figura 4.4.2*

Ejemplo de lo que se visualizaría en la zona de ejes.

4.4.2. BARRA DE HERRAMIENTAS

*Figura 4.4.3*

Barra de herramientas.

Este panel (ver figura 4.4.3) sirve para realizar las acciones de **zoom in**, **zoom out**, **explorar el mapa**, y **cargar mapas** con giros previamente guardados. Puede verse un ejemplo de ampliación en la figura 4.4.4.

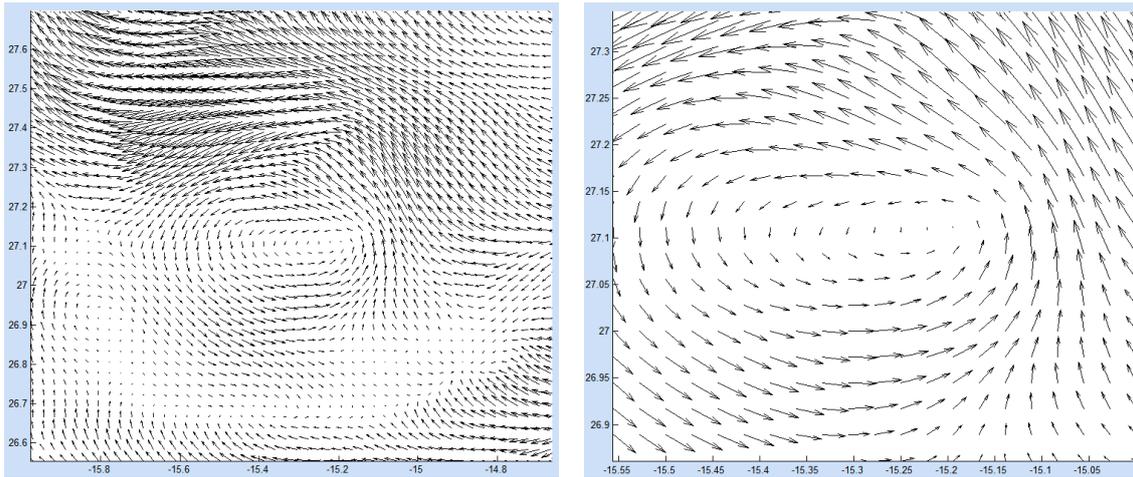


Figura 4.4.4

Ejemplo de la acción que realiza el zoom in.

4.4.3. NAVEGADOR TEMPORAL Y DE PROFUNDIDAD

Existen dos pestañas de navegación temporal y de profundidad (ver figura 4.4.5) se cambiará la visualización del mapa en cuanto a instante de tiempo y nivel de profundidad. Las pestañas se inicializan automáticamente en función de las dimensiones del mapa.

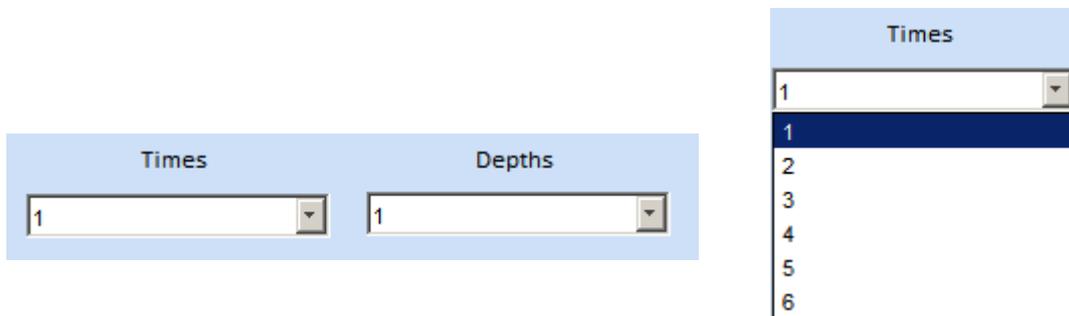


Figura 4.4.5

Navegador temporal y de profundidad.

4.4.4. BOTONES DE OPCIONES

Con los botones de opciones (ver figura 4.4.6) el usuario seleccionará si quiere visualizar la detección automática, comparar la detección manual con la automática o ver el tiempo de vida de los giros detectados en el instante de tiempo y profundidad para los que se esté visualizando el mapa. Sólo uno de estos botones puede estar pulsado a la vez ya que realizan tareas excluyentes.

Mediante los dos cuadros de texto editables del primer botón el usuario podrá modificar los parámetros de la caracterización automática.

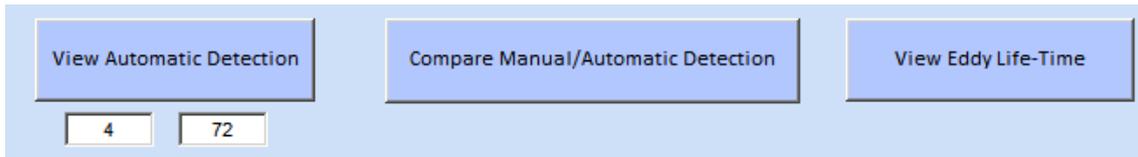


Figura 4.4.6

Botones de opciones

4.4.5. CREADOR Y SELECTOR DE GIROS

El botón **New Eddy**, mostrado en la figura 4.4.7, crea un nuevo giro en el instante de tiempo actual y lo selecciona automáticamente como giro actual. Sólo se podrá crear un giro cuando al anterior se le haya seleccionado su ubicación y ambos radios.

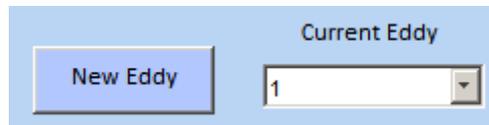


Figura 4.4.7

Creador y selector de giros.

La pestaña de **Current Eddy** selecciona el giro actual con cuyos parámetros se quiere trabajar y modificar.

4.4.6. ESTIMAR FORMA 3D DEL GIRO

Esta función (ver figura 4.4.8), interpola la sección del giro caracterizado actual en el instante de tiempo actual y profundidad actual con las superficies modificadas por el usuario más cercanas en los niveles de profundidad superior e inferior rellenando las secciones de profundidad con las interpolaciones. Estos valores se podrán modificar a su vez y volver a realizar la interpolación, puesto que las interpolaciones se consideran diferentes a las superficies caracterizadas directamente por el usuario.

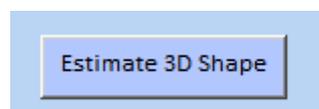


Figura 4.4.8

Botón para estimar la forma 3D del giro.

4.4.7. UBICAR Y DAR FORMA AL GIRO

En esta sección de la interfaz se puede elegir qué acción realizar en cuanto a la ubicación y forma del giro, y su aspecto es el que se muestra en la figura 4.4.9. Las

opciones son excluyentes, es decir, sólo podrá estar seleccionada una de ellas. Tras seleccionar una opción se podrá realizar sobre el área de representación de los **Ejes**.

La acción que se podrá realizar en cualquier momento es la de seleccionar el centro. Seleccionar el radio 1 solo será posible habiendo previamente seleccionado el centro, seleccionar el radio 2, si se ha seleccionado previamente el radio 1 y asignar velocidad tras haber seleccionado el radio 2.

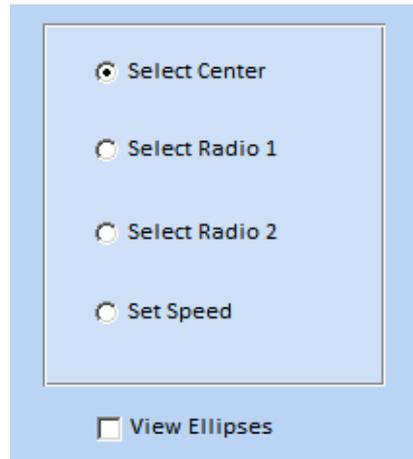


Figura 4.4.9

Radio Group que permite seleccionar la acción sobre los ejes.

La casilla **View Ellipses** sirve bien para ver solamente los radios de los giros marcados o bien para ver las elipses correspondientes que se formarían según las dimensiones de los radios.

4.4.8. DIVISIONES ANGULARES Y RADIALES



Figura 4.4.10

Zona que permite tanto visualizar las divisiones como modificar las mismas.

Esta es la parte de la interfaz desde la que se pueden seleccionar las divisiones radiales y angulares del giro actual, que por defecto no estará dividido. Su aspecto se muestra en la figura 4.4.10. La casilla **view divisions** servirá para visualizar las secciones o no.

4.4.9. GUARDAR GIROS

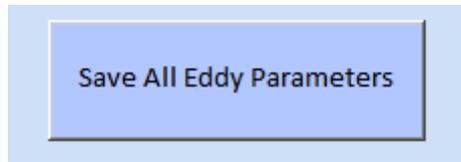


Figura 4.4.11

Botón que permite guardar los giros en un fichero.

Con el botón de almacenamiento (ver figura 4.4.11) se guardará el estado actual del mapa en el instante de tiempo actual, con la caracterización manual. Esto también incluye las caracterizaciones de los giros en cuanto a profundidad.

La acción de almacenamiento generará un archivo que posteriormente podrá ser cargado.

4.5. DIAGRAMA FUNCIONAL

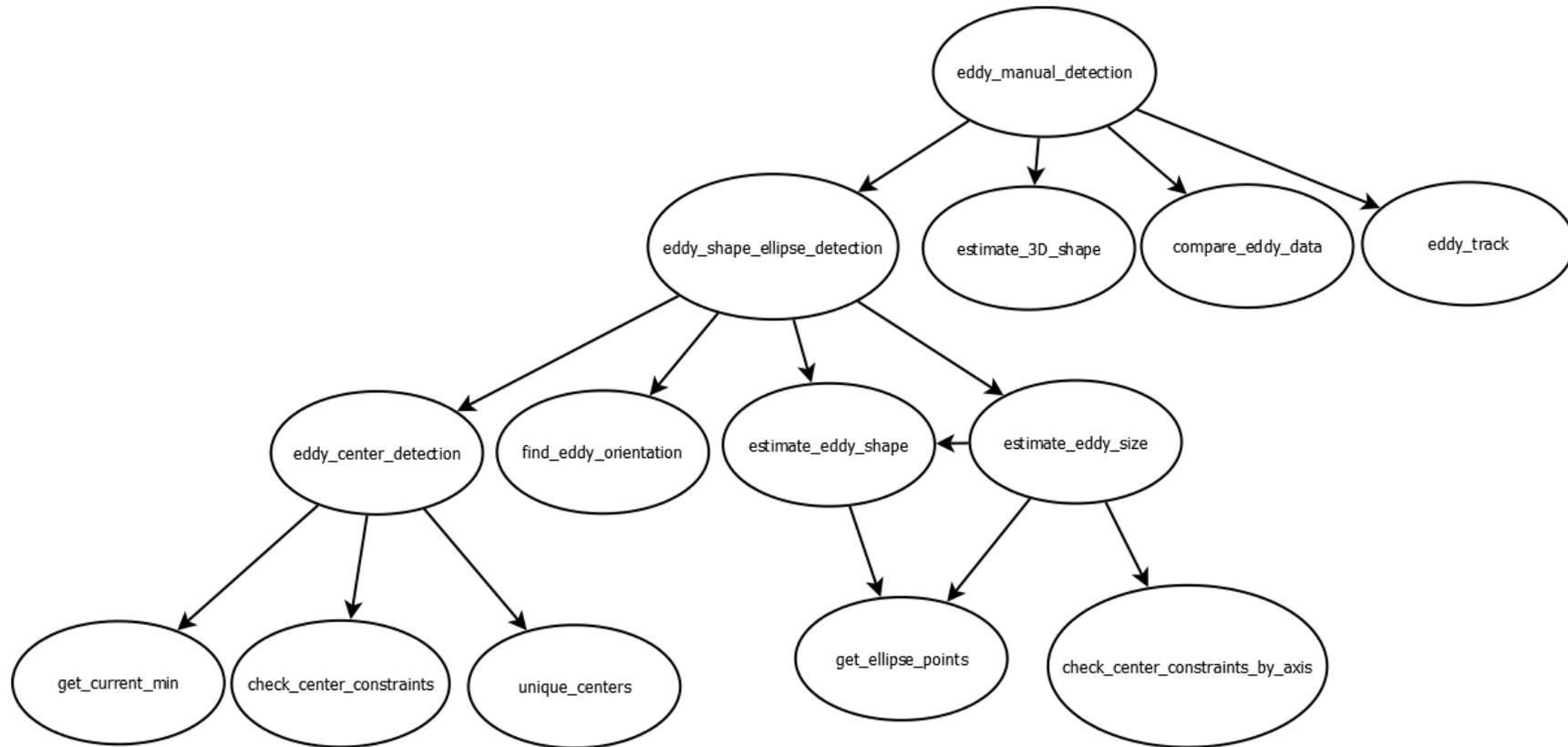


Figura 4.5.1

Diagrama funcional del sistema.

El diagrama funcional completo del sistema se detalla en la figura 4.5.1

5. IMPLEMENTACIÓN

El proyecto en su totalidad ha sido desarrollado en Matlab y, puesto que su soporte para la programación orientada a objetos presenta aún algunas deficiencias, la forma de implementación ha sido íntegramente desarrollada en programación funcional.

En esta sección se analiza la implementación de cada uno de los módulos que conforman el diseño del proyecto. Básicamente se describe el uso de las funciones implementadas más importantes, se explican algunas de las funciones de Matlab utilizadas y se analizan en detalle las secciones de código más dignas de mención.

Los módulos en los que se divide el sistema, como anteriormente se indicó, son los siguientes:

- El sistema de caracterización manual, que está incrustado en el de la interfaz de usuario debido a la alta interrelación entre ambos.
- El sistema de caracterización automática, formado por los dos métodos implementados, el basado en el rotacional y el basado en el ajuste de elipses al campo vectorial.
- El sistema de seguimiento del tiempo de vida de los giros.
- El módulo de comparación de resultados.

5.1. MÓDULO DE CARACTERIZACIÓN MANUAL

El módulo de caracterización manual está mezclado con la interfaz gráfica, ya que se trata de un sistema que básicamente está basado en las acciones que el usuario haga y por lo tanto, lo más sencillo es utilizar las funciones que se disparan según eventos.

La interfaz gráfica está realizada con GUIDE, el entorno de desarrollo para interfaces gráficas de usuario de Matlab, el cual genera una serie de funciones “callbacks” al introducir en la interfaz los diferentes elementos que la constituyen. Las funciones se activan al interactuar el usuario con dichos elementos.

5.1.1. EDDY_MANUAL_SELECTION

Es el punto de entrada a toda la aplicación y genera la interfaz gráfica. Al utilizar esta función todo queda preparado para que el usuario interactúe con el sistema.

El módulo está pensado para ser integrado en una aplicación genérica desde la que sería invocado, por lo que asume que los mapas de corriente que sirven de datos de entrada ya han sido seleccionados y están disponibles.

5.1.2. LOADEDIES_CLICKEDCALLBACK

Carga los mapas de corrientes y la información de los giros marcados manualmente en caso de que los hubiera. También se utiliza para inicializar las variables comunes que se requerirán en todo el módulo.

Código relevante

```
graphic_eddy =
struct('center',0,'r1',0,'r2',0,'ellipse',0,'ellipse rad div',[],'ellipse ang div',[]);
graphic_eddy_array = graphic_eddy;
```

Aquí se inicializa la variable **graphic_eddy_array**, que contiene un array de structs con los manejadores gráficos de cada giro para poder borrarlos de la gráfica según sea necesario.

```
info_eddy =
struct('c_lon',zeros(1,depth_len),'c_lat',zeros(1,depth_len),'r1',zeros(1,depth_len),'r2',zeros(1,depth_len),'angle',zeros(1,depth_len),'modified_depths',zeros(1,depth_len),'rad_div',1,'ang_div',1,'speed',[]);
info_eddy_array = info_eddy;
```

info_eddy_array es un array de structs que contiene las características de cada giro: La ubicación de su centro, la longitud de sus radios, su ángulo, las profundidades modificadas por el usuario, las divisiones angulares y radiales y la velocidad de cada sección en cada nivel de profundidad.

```
eddy_map = struct('t',-1,'eddies',info_eddy_array);
eddy_map.t = 1;
eddy_map_array = eddy_map;
```

eddy_map_array es un array que contiene un struct cuyos campos son el tiempo y los **info_eddy** correspondientes a los giros de ese instante de tiempo.

```
automatic_eddy = struct('c_lon',-1,'c_lat',-1,'r1',0,'r2',0,'angle',-1,'cyclonic',0);
automatic_array = [];
automatic_map = struct('t',-1,'eddies',[]);
automatic_map_array = [];
```

automatic_eddy_array juega un papel análogo a **eddy_map_array**, pero para los giros detectados con el método automático. Esto se hace así para que cada vez que se quieran visualizar los giros detectados automáticamente, no se ejecute el algoritmo, ya que puede llegar a tardar varios segundos.

```
quiver(handles.lons,handles.lats,handles.U(:,:,1,1), handles.V(:,:,1,1),5,'k');
hold on;
```

La función **quiver** es una función de Matlab que permite representar gráficamente un campo vectorial.

El resto de funciones callback se resumen en la siguiente lista, debido a que su función es bastante obvia y no merece la pena entrar en detalles:

- **createEddy_Callback**: Crea un nuevo giro.

- **markSelection_SelectionChangeFcn:** Configura lo necesario para que el usuario pueda realizar la acción elegida en el radio button.
- **axisAction_WindowButtonDownFcn:** Al pulsar con el ratón sobre la figura se realiza la acción elegida en el radio button.
- **viewEllipses_Callback:** Representa las elipses del mapa o las elimina dejando solo los ejes de los giros según el usuario lo marque o no.
- **saveEddies_Callback:** Guarda el mapa y la información de los giros marcados manualmente en un archivo “.mat” que puede ser cargado posteriormente.
- **assignRadDiv_Callback:** Asigna al giro las divisiones radiales establecidas por el usuario en la pestaña correspondiente.
- **assignAngDiv_Callback:** Asigna al giro las divisiones angulares establecidas por el usuario en la pestaña correspondiente.
- **viewDivs_Callback:** Representa las divisiones tanto radiales como angulares actuales del giro o las borra según sea el valor del checkbox.
- **assignSpeed_Callback:** Asigna a una sección de un giro la velocidad establecida por el usuario en el cuadro de texto editable que aparece.
- **changeTimeView_Callback:** Cambia el instante de tiempo de visualización del mapa de corrientes, representando los giros marcados manualmente de ese nuevo instante de tiempo si los hubiera.
- **changeDepthView_Callback:** Cambia la profundidad de visualización del mapa de corrientes, representando las superficies de los giros marcados manualmente de esa sección de profundidad si los hubiera.
- **changeActualEddy_Callback:** Cambia de giro actual.
- **automaticDetection_Callback:** Permite visualizar en el mapa la caracterización automática de giros en ese instante de tiempo y profundidad.
- **comparation_Callback:** Permite visualizar la comparación entre los giros marcados manualmente con los automáticamente generados para ver sus diferencias.
- **interpolateEddySurfaces_Callback:** Genera nuevas superficies de giros con todos sus atributos a partir de las dos más cercanas (en profundidad) marcadas manualmente por el usuario.
- **eddyTrack_Callback:** Visualiza el tiempo de vida de los giros detectados en ese instante de tiempo hasta el final temporal del mapa.

5.2. MÓDULO DE CARACTERIZACIÓN AUTOMÁTICA

A continuación se explican las funciones utilizadas y las partes más importantes del código referente a la caracterización automática, empezando por la implementación del método de detección de centros de giro, ya que éste es usado por ambos métodos de estimación de forma.

5.2.1. MÉTODO DE DETECCIÓN DE CENTROS DE GIRO

5.2.1.1. EDDY_CENTER_DETECTION

La función `eddy_center_detection` constituye el punto de entrada de la detección de centros. Localiza la ubicación de los centros de los giros de un determinado mapa en un instante de tiempo y en un nivel de profundidad.

Entrada

- `lon`: Vector de longitudes del mapa.
- `lat`: Vector de latitudes del mapa.
- `U`: Array de 4 dimensiones conteniendo la componente U de cada vector en un punto determinado por la longitud, latitud, profundidad y tiempo.
- `V`: Array de 4 dimensiones conteniendo la componente V de cada vector en un punto determinado por la longitud, latitud, profundidad y tiempo.
- `rot_map`: Matriz de valores generados al aplicar el operador rotacional sobre los arrays U y V.
- `t`: Instante de tiempo del mapa en el que se quiere localizar los centros de giros.
- `depth`: Profundidad.
- `rotate_max_area`: Área máxima que se puede alcanzar a la hora de aplicar las restricciones sobre un candidato a centro de giro.
- `max_angle`: Máximo ángulo permitido entre los pares de ángulo de los vectores alrededor del centro del giro.

Salida

- `real_centers_min`: Array de 2 dimensiones que contiene los centros de los giros anticiclónicos localizados.
- `rot_centers_min`: Ubicación de los mínimos locales del rotacional asociados a los centros de giros anticiclónicos. Utilizados para el método de estimación basado en el rotacional.
- `real_centers_max`: Array de 2 dimensiones que contiene los centros de los giros ciclónicos localizados.
- `rot_centers_max`: Ubicación de los máximos locales del rotacional asociados a los centros de giros ciclónicos. Utilizados para el método de estimación basado en el rotacional.

Código relevante

```
5 local_min = imregionalmin(rot_map);
6 local_max = imregionalmax(rot_map);
```

Tanto **imregionalmin** como **imregionalmax** son funciones proporcionadas por Matlab. Dada una matriz de valores, devuelven matrices de 0s y 1s indicando con los 1s la ubicación de los mínimos o máximos locales según sea el caso. Estas funciones son utilizadas para localizar los máximos/mínimos locales del rotacional.

5.2.1.2. GET_CURRENT_MIN

La función **get_current_min**, dado un punto del mapa, localiza un mínimo local de magnitud de corriente siguiendo la tendencia descendente de la corriente a partir del punto dado.

Entrada

- lon: Longitud del punto de partida
- lat: Latitud del punto de partida
- U: Array de 4 dimensiones conteniendo la componente U de cada vector en un punto determinado por la longitud, latitud, profundidad y tiempo.
- V: Array de 4 dimensiones conteniendo la componente V de cada vector en un punto determinado por la longitud, latitud, profundidad y tiempo.
- t: Instante de tiempo del mapa.
- depth: Profundidad.

Salida

- val: Magnitud del vector de corriente en el punto localizado como mínimo local de corriente.
- index_lon: Longitud del punto donde se encuentra el mínimo local de corriente.
- index_lat: Latitud del punto donde se encuentra el mínimo local de corriente.

Código relevante

```
[val,index] = min(curr_vec);
if(val == actual)
    [new_val,new_lon,new_lat]=expand_search(lon,lat,U,V,t,lon_size,lat_size);
    if(val == new_val)
        index_lon = lon;
        index_lat = lat;
    else
        [val,index_lon,index_lat]=get_current_min(new_lon,new_lat,U,V,t);
    end
else
    [val,index_lon,index_lat] =
get_current_min(lon+index_vec(index,1),lat+index_vec(index,2),U,V,t);
end
```

Se comprueba si el punto actual tiene el mínimo de corriente de entre sus vecinos; si es así, se expande el área de vecindad y se vuelve a comprobar si el actual corresponde con el mínimo. En ese caso, el algoritmo termina. En caso contrario, se continúa el algoritmo desde el nuevo punto.

5.2.1.3. CHECK_CENTER_CONSTRAINTS

La función **check_center_constraints** comprueba que dado un candidato a centro de giro se cumplan las tres restricciones explicadas anteriormente en la fase de diseño.

Entrada

- lon: Longitud del candidato a centro de giro
- lat: Latitud del candidato a centro de giro
- U: Array de 4 dimensiones conteniendo la componente U de cada vector en un punto determinado por la longitud, latitud, profundidad y tiempo.
- V: Array de 4 dimensiones conteniendo la componente V de cada vector en un punto determinado por la longitud, latitud, profundidad y tiempo.
- t: Instante de tiempo del mapa en el que se quiere localizar los centros de giros.
- depth: Profundidad.
- rotate_max_area: Área máxima que se puede alcanzar a la hora de aplicar las restricciones sobre un candidato a centro de giro.
- max_angle: Máximo ángulo permitido entre los pares de ángulo de los vectores alrededor del centro del giro.

Salida

- res: La respuesta a los test. Si es 1 el candidato a centro de giro, es un centro de giro. En caso contrario, no lo es.
- type: Indica si el giro es ciclónico o anticiclónico. Ciclónico = 1, anticiclónico = 2.

Código relevante

```
for i=2:rotate_max_area
    if((lon-i <= 0) || (lon+i > lon_size) || (lat-i <= 0) || (lat+i > lat_size))
        continue;
    end
    res = check_vorticity(U,V,lon,lat,t,i);
    if(res == 0)
        continue;
    end
    [res,type] = check_rotate_sense(U,V,lon,lat,t,i);
    if(res == 1)
        break;
    end
end
```

En esta sección de código se ve cómo se intenta cumplir las 3 restricciones redimensionando el cuadrante hasta que se llegue al parámetro de entrada **rotate_max_area**. Las dos primeras restricciones se comprueban con **check_vorticity** y la tercera con **check_rotate_sense**. Si alguna de las dos primeras no se cumple, no se comprueba la tercera y se vuelve a redimensionar el área alrededor del candidato a centro de giro.

5.2.1.4. CHECK_PAIR

La función **check_pair** es utilizada por **check_rotate_sense** (test de la tercera restricción) para comprobar si un par de vectores sigue un sentido adecuado de rotación.

Entrada

- U1: Componente U del vector 1.
- V1: Componente V del vector 1.
- U2: Componente U del vector 2.
- V2: Componente V del vector 2.
- max_angle: Máximo ángulo permitido entre los pares de ángulo de los vectores alrededor del centro del giro.

Salida

- res: Si es 1, los dos vectores siguen un sentido adecuado de rotación. 0, en caso contrario.

Código relevante

```
MAX_INV_ANG_DIFF = 0.1745;

if(beta > alfa)
  if(beta - alfa <= max_angle)
    res = 1;
  end
else
  if((beta + 2*pi - alfa <= max_angle) || (alfa - beta <= MAX_INV_ANG_DIFF))
    res = 1;
  end
end
```

Se considera un sentido adecuado de rotación si la diferencia se encuentra dentro de los umbrales establecidos.

5.2.1.5. UNIQUE_CENTERS

La función **unique_centers** asigna a cada mínimo local de magnitud de corriente un máximo o mínimo local del rotacional según se trate de un giro ciclónico o anticiclónico. Este procedimiento es útil para la estimación de la forma basada en rotacional, pero innecesario para la estimación basada en el ajuste de elipses al campo vectorial.

Entrada

- real_centers: Array de 2 dimensiones que contiene las coordenadas de los puntos con mínimos locales de magnitud de corriente.

- `rot_centers`: Array de 2 dimensiones que contiene las coordenadas de los puntos con máximos o mínimos locales del rotacional según se trate de un giro ciclónico o anticiclónico.
- `rot_values`: Vector de valores de los máximos/mínimos del rotacional.
- `lon_size`: Número de puntos longitudinales del mapa.
- `lat_size`: Número de puntos latitudinales del mapa.
- `max_min`: Indica si se trata de un giro ciclónico o anticiclónico.

Salida

- `real_centers_unique`: Array de 2 dimensiones que contiene las coordenadas de los puntos con mínimos locales de magnitud de corriente asignados a un máximo/mínimo del rotacional cada uno.
- `rot_centers_unique`: Array de 2 dimensiones que contiene las coordenadas de los puntos con máximos/mínimos del rotacional asignados a un solo mínimo de corriente.

5.2.1.6. CHOOSE_ROT_CENTER

La función `choose_rot_center` es llamada por `unique_centers` para asignar a un mínimo de corriente un solo máximo/mínimo del rotacional. Es la función que implementa la heurística explicada en la fase de diseño.

Entrada

- `rot_centers_to_check`: Coordenadas de los máx/mín del rotacional a partir de los cuales se ha hallado el mismo mínimo de corriente.
- `real_center`: Punto con mínimo de corriente.
- `rot_values_to_check`: Valores de los máx/mín del rotacional.
- `lon_size`: Número de puntos longitudinales del mapa.
- `lat_size`: Número de puntos latitudinales del mapa.
- `max_min`: Indica si se trata de un giro ciclónico o anticiclónico.

Salida

- `chosen_rot_center`: Coordenadas del máx/mín escogido.

Código relevante

```
DIST_FACTOR = 100;
ROT_FACTOR = 40;

if(strcmp(max_min, 'max'))
    val = max(rot_values_to_check);
else
    val = min(rot_values_to_check);
end

distances = get_distances_to_real_center(rot_centers_to_check, real_center);
size_factor = (lon_size + lat_size)/2;
```

```

.
.
.
for i=1:length(distances)
    distances(i) = DIST_FACTOR*distances(i)/size factor + ROT_FACTOR*abs(val-
rot values to check(i));
end

```

get_distances_to_real_center proporciona las distancias euclídeas de los centros rotacionales a los centros reales. Posteriormente esta distancia hallada es modificada teniendo en cuenta la diferencia entre el valor del rotacional del centro rotacional actual y el máximo o mínimo de los centros rotacionales. El centro rotacional o máx/mín local del rotacional con menor distancia asociada será el elegido para ser asignado al punto con mínimo local de corriente.

5.2.2. MÉTODO BASADO EN EL ROTACIONAL

5.2.2.1. EDDY_SHAPE_CURL_DETECTION

La función **eddy_shape_curl_detection** es el punto de entrada a la detección y caracterización de la forma de los giros haciendo uso del operador rotacional. Como se indicó anteriormente, esta función usará el método de detección de centros de giro y luego estimará la forma de los mismos.

Entrada

- lon: Vector de longitudes del mapa.
- lat: Vector de latitudes del mapa.
- U: Array de 4 dimensiones conteniendo la componente U de cada vector en un punto determinado por la longitud, latitud, profundidad y tiempo.
- V: Array de 4 dimensiones conteniendo la componente V de cada vector en un punto determinado por la longitud, latitud, profundidad y tiempo.
- t: Instante de tiempo del mapa en el que se quiere localizar los centros de giros y estimar su forma.
- depth: Profundidad.
- rotate_max_area: Área máxima que se puede alcanzar a la hora de aplicar las restricciones sobre un candidato a centro de giro.

Salida

- automatic_info_eddy_array: Información de los giros detectados (ubicación y forma).

Código relevante

```
rot_map = curl(lon, lat, U(:,:,depth,t), V(:,:,depth,t));
```

Aquí se hace uso de la función propia de Matlab `curl`. Esta función, dado un campo vectorial, devuelve una matriz con los valores del rotacional en cada punto. Esta matriz se usa tanto para la detección de centros de giro, como se explicó en el apartado anterior, como en la estimación de la forma de los mismos por medio de este método.

```
limit = get_boundary_min(rot_centers_min(1,i),rot_centers_min(2,i),rot_map,value);
correction_lon = real_centers_min(1,i) - rot_centers_min(1,i);
correction_lat = real_centers_min(2,i) - rot_centers_min(2,i);
for k=1:length(limit(1,:))
    limit(1,k) = lon(limit(1,k)+correction_lon);
    limit(2,k) = lat(limit(2,k)+correction_lat);
    plot(limit(1,k),limit(2,k),'r*');
end
```

En esta sección de código se obtienen los puntos del límite del giro con `get_boundary_min` (sección de código de giros anticiclónicos). Después se obtiene una corrección, ya que los centros rotacionales no tienen por qué coincidir con los centros reales de los giros, como se explicó en el capítulo de diseño. Esta corrección se usa para modificar el límite hallado y centrarlo en el centro real del giro en vez del centro rotacional.

5.2.2.2. GET_BOUNDARY_VALUE

La función `get_boundary_value` es la que se encarga de obtener el valor del rotacional que luego será usado para delimitar la forma del giro.

Entrada

- `c_lon`: Longitud del centro rotacional del giro.
- `c_lat`: Latitud del centro rotacional del giro.
- `rot_map`: Matriz que contiene los valores del rotacional para cada punto del mapa.
- `max_min`: Indica si se trata de un giro ciclónico o anticiclónico.

Salida

- `value`: Valor del rotacional que hará de limitador al buscar el borde del giro.

Código relevante

```
while({...} && abs(rot_map(floor(lat),floor(lon)) - rot_map(floor(lat-
step(2,i),floor(lon-step(1,i)))) >= abs(rot_map(floor(lat-step(2,i),floor(lon-
step(1,i))) - rot_map(floor(lat-2*step(2,i),floor(lon-2*step(1,i))))))
.
.
.
```

Por medio de este bucle se avanza hasta que se alcance un punto en el que la pendiente en valor absoluto deje de aumentar, es decir, uno de los puntos de inflexión de la superficie rotacional.

5.2.2.3. GET_BOUNDARY_MAX/MIN

Get_boundary_max/min es una función recursiva que por medio de un algoritmo de inundación obtiene los puntos límite del área estimada como forma del giro. Hay dos funciones, una para los giros ciclónicos y otra para los anticiclónicos.

Entrada

- `lon`: Longitud del centro rotacional (en la primera llamada).
- `lat`: Latitud del centro rotacional (en la primera llamada).
- `rot_map`: Matriz de valores del rotacional.
- `value`: valor limitante para el algoritmo de inundación.

Salida

- `limit`: Coordenadas del borde estimado del giro (al final de la última llamada).

Código relevante

```
if({...} && (rot_map(lat,lon) < value))
.
.
.
```

Sección de código para los giros anticiclónicos. Mientras el valor actual del rotacional no supere al valor limitante se sigue explorando recursivamente.

```
if({...} && (rot_map(lat,lon) > value))
.
.
.
```

Sección de código para los giros ciclónicos.

5.2.3. MÉTODO BASADO EN EL AJUSTE DE ELIPSES AL CAMPO VECTORIAL

5.2.3.1. EDDY_SHAPE_ELLIPSE_DETECTION

La función **eddy_shape_ellipse_detection** es el punto de entrada al método basado en el ajuste de elipses explicado en el capítulo de diseño.

Entrada

- `vec_lon`: Vector de longitudes del mapa.
- `vec_lat`: Vector de latitudes del mapa.
- `U`: Array de 4 dimensiones conteniendo la componente U de cada vector en un punto determinado por la longitud, latitud, profundidad y tiempo.
- `V`: Array de 4 dimensiones conteniendo la componente V de cada vector en un punto determinado por la longitud, latitud, profundidad y tiempo.

- `t`: Instante de tiempo del mapa en el que se quiere localizar los centros de giros y estimar su forma.
- `depth`: Profundidad.
- `rotate_max_area`: Área máxima que se puede alcanzar a la hora de aplicar las restricciones sobre un candidato a centro de giro y encontrar su orientación.

Salida

- `automatic_info_eddy_array`: Información de los giros detectados (ubicación y forma).
- `error`: Error de adaptabilidad del contorno al campo vectorial.

Código relevante

```
[axis 1,axis 2,angle] =
find_eddy_orientation(real_centers_min(1,i),real_centers_min(2,i),U,V,t,depth,rotate_max_area);
[axis_1,axis_2,error] =
estimate_eddy_shape(axis_1,axis_2,angle,real_centers_min(1,i),real_centers_min(2,i),U,V,t,depth,0);
[axis 1,axis 2] =
estimate_eddy_size(axis_1,axis_2,angle,real_centers_min(1,i),real_centers_min(2,i),U,V,t,depth);
```

Los puntos más importantes de la función son éstos. Se obtiene la orientación del giro, se estima su forma y se estima por último su tamaño. Esto se hace para todos los giros encontrados por el método de detección de centros.

5.2.3.2. FIND_EDDY_ORIENTATION

La función **find_eddy_orientation** se encarga de calcular o estimar la orientación correcta del giro.

Entrada

- `center_lon`: Longitud del centro del giro
- `center_lat`: Latitud del centro del giro.
- `U`: Array de 4 dimensiones conteniendo la componente U de cada vector en un punto determinado por la longitud, latitud, profundidad y tiempo.
- `V`: Array de 4 dimensiones conteniendo la componente V de cada vector en un punto determinado por la longitud, latitud, profundidad y tiempo.
- `t`: Instante de tiempo del mapa.
- `depth`: Profundidad.
- `max_area`: Área máxima a la que se puede llegar al buscar la orientación.

Salida

- `axis_1`: Posiciones de los dos extremos del primer eje.
- `axis_2`: Posiciones de los dos extremos del segundo eje.
- `angle`: Ángulo del giro (ángulo del primer eje).

Código relevante

```

ort_diff_1 = ortogonal_diff(vec_angle_1,axis_1(1),axis_1(2),center_lon,center_lat);
ort_diff_2 = ortogonal_diff(vec_angle_2,axis_1(3),axis_1(4),center_lon,center_lat);
ort_diff_3 = ortogonal_diff(vec_angle_3,axis_2(1),axis_2(2),center_lon,center_lat);
ort_diff_4 = ortogonal_diff(vec_angle_4,axis_2(3),axis_2(4),center_lon,center_lat);
mean = (ort_diff_1^2 + ort_diff_2^2 + ort_diff_3^2 + ort_diff_4^2) / 4;
if(mean < min_diff_angle_dist(1))
    min_diff_angle_dist(1) = mean;
    min_diff_angle_dist(2) = i;
    min_diff_angle_dist(3) = j;
end

```

En este fragmento de código se calcula la diferencia angular de los cuatro vectores coincidentes con las cuatro posiciones de los dos ejes con respecto al vector ortogonal a cada eje. Esta operación se hace para cada orientación posible (de forma discreta) y al final se obtiene la orientación con el menor error cuadrático medio.

5.2.3.3. ESTIMATE_EDDY_SHAPE

La función `estimate_eddy_shape` obtiene la forma del giro. Va disminuyendo uno de los ejes hasta que el error entre los vectores tangentes a la elipse coincidente con dichos ejes y los vectores del mapa de corrientes sea mínimo.

Entrada

- `axis_1`: Posiciones de los dos extremos del primer eje.
- `axis_2`: Posiciones de los dos extremos del segundo eje.
- `angle`: Ángulo de orientación del giro.
- `lon`: Longitud del centro del giro
- `lat`: Latitud del centro del giro.
- `U`: Array de 4 dimensiones conteniendo la componente U de cada vector en un punto determinado por la longitud, latitud, profundidad y tiempo.
- `V`: Array de 4 dimensiones conteniendo la componente V de cada vector en un punto determinado por la longitud, latitud, profundidad y tiempo.
- `t`: Instante de tiempo del mapa.
- `depth`: Profundidad.
- `cyclonic`: Indica si el giro es ciclónico o anticiclónico.

Salida

- `axis_1`: Posiciones de los dos extremos del primer eje.
- `axis_2`: Posiciones de los dos extremos del segundo eje.
- `error`: Error angular de la comparación entre los vectores tangentes con la elipse y los vectores de corrientes del mapa coincidentes con los puntos de la elipse.

Código relevante

```

.
.
.
while(error < old_error)
  axis 1 = new axis 1;
  axis 2 = new axis 2;
  old error = error;
  [new axis 1,new axis 2] = reduce_axis(lon,lat,axis 1,axis 2,target axis);
  ellipse_points = get_ellipse_points(lon,lat,new_axis_1,new_axis_2,angle,1);
  error = calculate_vector_error(ellipse_points,U,V,t,depth,cyclonic);
.
.
.

```

En este fragmento se puede ver el núcleo de la función en el que se reduce un eje y se calcula el error hasta que no se produzca mejora sobre la anterior estimación.

5.2.3.4. ESTIMATE_EDDY_SIZE

La función **estimate_eddy_size** estima el tamaño máximo de un giro y vuelve a estimar la forma de éste.

Entrada

- **axis_1**: Posiciones de los dos extremos del primer eje.
- **axis_2**: Posiciones de los dos extremos del segundo eje.
- **angle**: Ángulo de orientación del giro.
- **lon**: Longitud del centro del giro
- **lat**: Latitud del centro del giro.
- **U**: Array de 4 dimensiones conteniendo la componente U de cada vector en un punto determinado por la longitud, latitud, profundidad y tiempo.
- **V**: Array de 4 dimensiones conteniendo la componente V de cada vector en un punto determinado por la longitud, latitud, profundidad y tiempo.
- **t**: Instante de tiempo del mapa.
- **depth**: Profundidad.
- **cyclonic**: Indica si el giro es ciclónico o anticiclónico.

Salida

- **axis_1**: Posiciones de los dos extremos del primer eje.
- **axis_2**: Posiciones de los dos extremos del segundo eje.

Código relevante

```

[axis_1,axis_2] = get_biggest_eddy(axis_1,axis_2,angle,lon,lat,U,V,t,depth);
[axis_1,axis_2,~]=estimate_eddy_shape(axis_1,axis_2,angle,lon,lat,U,V,t,depth,cyclonic);

```

En este fragmento de código se puede ver como primero se estima el giro más grande posible y luego se llama a **estimate_eddy_shape** por si al aumentar el tamaño, la forma ha podido variar.

5.2.3.5. GET_BIGGEST_EDDY

La función `get_biggest_eddy` estima el giro más grande que cumpla las restricciones. Llama a `get_first_too_big_eddy_size` y `get_first_correct_eddy_size`.

5.2.3.6. GET_FIRST_TOO_BIG_EDDY_SIZE

La función `get_first_too_big_eddy_size`, obtiene la primera elipse que no cumpla las restricciones, es decir, la más pequeña.

Código relevante

```
while((first==1)||
(check center constraints by axis(new axis 1,new axis 2,angle,lon,lat,U,V,t,depth)))
  first = 0;
  axis 1 = new axis 1;
  axis 2 = new axis 2;
  [new_axis_1,new_axis_2] = resize_axis(lon,lat,axis_1,axis_2,0,0,1);
end
```

En este fragmento de código se muestra un bucle en el que se expanden los ejes mientras las restricciones se cumplan.

5.2.3.7. GET_FIRST_CORRECT_EDDY_SIZE

La función `get_first_correct_eddy_size`, a partir de la primera elipse incorrecta, disminuyendo los ejes obtiene la primera elipse correcta.

Código relevante

```
while((iterations < MAX_ITERATIONS) &&
(~check center constraints by axis(axis 1,axis 2,angle,lon,lat,U,V,t,depth)))
  [axis_1,axis_2] = resize_axis(lon,lat,axis_1,axis_2,old_axis_1,old_axis_2,0);
  iterations = iterations + 1;
end
```

Mientras no se cumplan las restricciones, se reducen los ejes. También se sale del bucle si se han dado más de MAX_ITERATIONS iteraciones.

5.2.3.8. CHECK_CENTER_CONSTRAINTS_BY_AXIS

La función `check_center_constraints_by_axis` comprueba dados sus ejes si la elipse cumple las restricciones.

Entrada

- `axis_1`: Posiciones de los dos extremos del primer eje.
- `axis_2`: Posiciones de los dos extremos del segundo eje.
- `angle`: Ángulo de orientación del giro.
- `lon`: Longitud del centro del giro
- `lat`: Latitud del centro del giro.

- U: Array de 4 dimensiones conteniendo la componente U de cada vector en un punto determinado por la longitud, latitud, profundidad y tiempo.
- V: Array de 4 dimensiones conteniendo la componente V de cada vector en un punto determinado por la longitud, latitud, profundidad y tiempo.
- t: Instante de tiempo del mapa.
- depth: Profundidad.

Salida

- res: Es 1 si se cumplen las restricciones, 0 en caso contrario.

Código relevante

```
res = check_vorticity_by_axis(axis_1,axis_2,angle,U,V,t,depth);
if(res == 0)
    return;
end
res = check_rotate_sense_by_axis(axis_1,axis_2,lon,lat,angle,U,V,t,depth);
```

Se puede ver como se comprueban las dos últimas restricciones; si la primera falla, no se comprueba la segunda.

5.3. MÓDULO DE COMPARACIÓN DE RESULTADOS

En esta sección se explica la función de comparación de resultados y sus partes de código de mayor interés.

5.3.1. COMPARE_EDDY_DATA

La función **compare_eddy_data** es el punto de entrada a la comparación de resultados de detección de giros. Devuelve una serie de indicadores que comparan ambos conjuntos de datos y los representa en una gráfica.

Entrada

- vec_lon: Longitudes del mapa.
- vec_lat: Latitudes del mapa.
- data_1: Array de estructuras con los parámetros básicos de los giros establecidos con el marcado manual.
- data_2: Array de estructuras con los parámetros básicos de los giros encontrados con el proceso automático por ajuste de elipses.
- depth: Profundidad del mapa.

Estructura de Datos Necesaria

La estructura de cada elemento del array **data_1**:

- c_lon: Array de longitudes del centro del giro en cada nivel de profundidad.

- `c_lat`: Array de latitudes del centro del giro en cada nivel de profundidad.
- `r1`: Array del primer radio en cada nivel de profundidad.
- `r2`: Array del segundo radio en cada nivel de profundidad.
- `angle`: Array del ángulo del giro en cada nivel de profundidad.

Solo se usará el valor de los arrays determinado por el parámetro **depth** a la hora de hacer la comparación.

La estructura de cada elemento del array **data_2**:

- `c_lon`: Longitud del centro del giro.
- `c_lat`: Latitud del centro del giro.
- `r1`: Primer radio.
- `r2`: Segundo radio.
- `angle`: Ángulo de la elipse que representa al giro.
- `cyclonic`: Indica si el giro es ciclónico o anticiclónico.

Hay que tener en cuenta que los campos de **data_2** no son arrays como los de **data_1**, sino variables simples.

Salida

- `match`: Número de giros encontrados coincidentes en ambos conjuntos.
- `radio_props_error`: Error medio entre la diferencia de proporciones de los giros coincidentes encontrados.
- `raw_angle_error`: Error medio entre la diferencia angular de los giros coincidentes encontrados.
- `perceptual_angle_error`: Error medio entre la diferencia angular de los giros coincidentes encontrados teniendo en cuenta las proporciones de sus radios.
- `size_error`: Diferencia media entre la media de los dos radios de cada giro.
- `global_error`: Media de la media entre los tres indicadores más importantes: `radio_props_error`, `perceptual_angle_error` y `size_error`.
- `found_ratio`: Ratio de giros del primer conjunto encontrados en el segundo.
- `excess_ratio`: Ratio de giros del segundo conjunto que no están en el primero.

Código relevante

```
if(equal_center_position(vec_lon,vec_lat,data_1(i),data_2(j),depth))
```

equal_center_position es la función que establece que dos centros de giro de los dos conjuntos de datos son el mismo giro. Se basa en la cercanía de su ubicación admitiendo un cierto error en la misma, ya que por ejemplo al caracterizar al giro

manualmente es difícil acertar exactamente con el centro que el detector automático consideraría.

```

if(data_1(i).r1(depth) > data_1(i).r2(depth)
    angle_1 = data_1(i).angle(depth);
    R1_1 = data_1(i).r1(depth);
    R2_1 = data_1(i).r2(depth);
else
    angle_1 = data_1(i).angle(depth) + pi/2;
    R1_1 = data_1(i).r2(depth);
    R2_1 = data_1(i).r1(depth);
end

```

Con esta sección se selecciona el radio mayor como radio 1 y el radio menor como radio 2. También asignando el ángulo adecuado según se trate de uno u otro. Este código se repite para el segundo conjunto de datos.

Esto se hace para que la comparación sea más precisa y objetiva.

5.4. MÓDULO DEL EDDY TRACKER

5.4.1. EDDY_TRACK

La función **eddy_track** detecta el tiempo de vida de los giros encontrados en el instante de tiempo actual hasta su muerte y los muestra en una gráfica.

Entrada

- lon: Longitud del centro del giro
- lat: Latitud del centro del giro.
- U: Array de 4 dimensiones conteniendo la componente U de cada vector en un punto determinado por la longitud, latitud, profundidad y tiempo.
- V: Array de 4 dimensiones conteniendo la componente V de cada vector en un punto determinado por la longitud, latitud, profundidad y tiempo.
- t_min: Instante de tiempo del mapa inicial en el que se quiere empezar a detectar el tiempo de vida de los giros.
- t_max: Instante de tiempo en el que se quiere finalizar el seguimiento.
- depth: Profundidad.
- rotate_max_area: Área máxima que se puede alcanzar a la hora de aplicar las restricciones sobre un candidato a centro de giro y posteriormente aplicar las restricciones sobre los mínimos locales de corriente.

Salida

- trace_min: Array de 3 dimensiones que contiene la posición de los giros anticiclónicos en el mapa determinado por longitud o latitud, número de giro y tiempo.
- trace_max: Array de 3 dimensiones que contiene la posición de los giros ciclónicos en el mapa determinado por longitud o latitud, número de giro y tiempo.

Código relevante

```
.  
.   
.   
[~,curr lon,curr lat] = get current min(actual lon,actual lat,U,V,j,depth);  
[res,type] = check center constraints(U,V,curr lon,curr lat,j,depth,rotate max area);  
if((res == 1) && (type == 1))  
    trace_min(1,i,iterator) = curr_lon;  
    trace_min(2,i,iterator) = curr_lat;  
end  
actual lon = curr lon;  
actual lat = curr lat;  
.   
.   
.
```

En este fragmento del bucle de los giros anticiclónicos se ve cómo se detecta el mínimo local de corriente desde el punto actual y se aplican las restricciones sobre él. Si es un centro de giro se almacena y en caso contrario no. Sin embargo se actualiza el punto actual siempre, ya que en la siguiente iteración se repetirá el proceso aunque no se haya encontrado ningún giro en la anterior. Esto se hace porque debido al carácter altamente dinámico de los giros (y a los posibles fallos de detección), los giros aparecen y desaparecen.

6. PRUEBAS REALIZADAS

En este capítulo se mostrarán las pruebas realizadas con los métodos de caracterización automática comparándolos con la caracterización manual realizada por el usuario para ver objetivamente cuál de los dos métodos es el que consigue unos mejores resultados.

Las pruebas realizadas a lo largo de este proyecto han tenido como objetivo servir de herramienta de evaluación y selección de los diferentes prototipos desarrollados. No constituyen un análisis estadístico o científico formal, al haber sido realizadas por la misma persona que ha programado el sistema, condicionando los resultados. De hecho, lo ideal es que la caracterización manual de los giros sea realizada por expertos oceanógrafos de forma totalmente independiente a la detección automática.

Se han hecho pruebas en diferentes zonas oceánicas. Sin embargo los resultados numéricos de la eficacia de los métodos se mostrarán sobre la zona oceánica de las Islas Canarias, que abarca desde la longitud -19 hasta la -12 y desde la latitud 26 a la 30. En esta zona hay abundancia de giros, y por lo tanto, es una zona adecuada para evaluar los resultados de las pruebas de forma objetiva.

6.1. PRUEBAS DE LA DETECCIÓN DE CENTROS

A continuación se van a realizar pruebas comparando la detección automática de centros con la detección manual, se irán cambiando los parámetros del área máxima de comprobación de restricciones y el ángulo máximo entre dos vectores adyacentes en la tercera restricción. Las pruebas se realizarán sobre un conjunto de 16 mapas modificando estos parámetros y obteniendo los resultados sobre el conjunto para los indicadores Found Ratio %, Excess Ratio % y Matching %.

Para una mejor comprensión de los datos se usarán la media y la varianza de los indicadores del conjunto completo, en vez de mostrar cada medida de cada mapa. En la tabla 6.1.1 pueden verse algunos resultados obtenidos usando como parámetros de detección un área máxima de 5x5 celdas, (donde cada celda mide 0.0278x0.0278 grados longitud/latitud) y un ángulo máximo de 72 grados.

Área máxima = 5x5, Ángulo máximo =72º

Fecha Mapa	Found Ratio %	Excess Ratio %	Matching %
01/08/2012	69.23	0	81.81
06/08/2012	68	0	80.95
14/04/2013	77.77	0	87.5
15/04/2013	54.54	14.28	66.66
16/04/2013	42.85	0	60
17/04/2013	33.33	0	50
22/10/2013	62.5	83.33	76.92

23/10/2013	83.33	0	90.9
24/10/2013	62.5	28.57	66.66
25/10/2013	66.66	20	72.72
26/10/2013	57.14	0	72.72
27/10/2013	50	0	66.66
28/10/2013	66.66	14.28	75
29/10/2013	44.44	0	61.53
30/10/2013	30	0	46.15
31/10/2013	54.54	0	70.58
Media	57,71	10,02	70,42
Varianza	209.84	435.09	141.7

Tabla 6.1.1

Ejemplo de los resultados para cada mapa, obteniendo la media de los mismos.

Por tanto se mostrará directamente la media del conjunto para cada valor del parámetro. Las áreas cuyos resultados se mostrarán son de 5x5, 7x7, 9x9 y 11x11 celdas. Los ángulos máximos serán 40º, 60º, 72º, 90º y 110º.

Área Máxima = 5x5

Ángulo Máximo	Found Ratio Medio %	Found Ratio Varianza % ²	Excess Ratio Medio %	Excess Ratio Varianza % ²	Matching Medio %	Matching Varianza % ²
40º	7.88	46.97	0	0	13.8	142.3
60º	37.95	384.98	11.45	363.43	50.12	441.22
72º	57.71	209.84	10.02	435.09	70.42	141.7
90º	68.79	162.13	13.05	176.79	75.36	76.15
110º	76.97	111.97	17.69	162.59	78.64	69.24

Tabla 6.1.2

Resultados para un área máxima de 5x5 celdas. Se aprecia cómo tanto la ratio de acierto como la de exceso aumentan a medida que se admite un mayor ángulo.

Área Máxima = 7x7

Ángulo Máximo	Found Ratio Medio %	Found Ratio Varianza % ²	Excess Ratio Medio %	Excess Ratio Varianza % ²	Matching Medio %	Matching Varianza % ²
40º	21.21	200.18	3.12	146.48	32.67	380.82
60º	52.81	443.11	5.49	97.67	64.98	356.2
72º	71.29	178.58	5.32	70.48	80,5	85.78

90°	78.42	161.58	15.72	201.53	80.1	93.06
110°	83.49	83.56	20.36	171.3	80.88	74.84

Tabla 6.1.3

Resultados para un área máxima de 7x7 celdas. Se vuelve a apreciar el mismo efecto sobre los indicadores que en la tabla 6.1.2.

Área Máxima = 9x9

Ángulo Máximo	Found Ratio Medio %	Found Ratio Varianza % ²	Excess Ratio Medio %	Excess Ratio Varianza % ²	Matching Medio %	Matching Varianza % ²
40°	29.27	171.24	4.68	173.33	43.38	263.75
60°	63.2	338.49	4.79	77.6	74.21	201.54
72°	76.75	196.17	6.31	73.7	83.67	101.71
90°	83.64	150.29	17.42	229.6	82,38	131.63
110°	86.65	92.35	21.19	171.85	81.98	88.89

Tabla 6.1.4

Resultados para un área máxima de 9x9 celdas. Sigue la tendencia de las tablas anteriores.

Área Máxima 11x11

Ángulo Máximo	Found Ratio Medio %	Found Ratio Varianza % ²	Excess Ratio Medio %	Excess Ratio Varianza % ²	Matching Medio %	Matching Varianza % ²
40°	32.8	144.69	5.31	135.83	47.18	192.26
60°	68.97	293.94	9.02	126.37	76.99	135.31
72°	79.68	191.99	12.85	138.73	82.47	104.57
90°	84.2	153.05	22.07	230.84	80,18	128.06
110°	87.46	95.02	27.07	147.029	79.36	79.47

Tabla 6.1.5

Resultados para un área máxima de 11x11 celdas. Sigue la tendencia de las tablas anteriores.

Los datos recogidos en las tablas 6.1.2, 6.1.3, 6.1.4 y 6.1.5 pueden ser representados gráficamente en dos dimensiones para cada indicador, siendo el eje X el área y el eje Y

el ángulo, con una escala de colores del rojo (valor menor) al amarillo (valor mayor) tal y como se muestra en la figura 6.1.1.



Figura 6.1.1

El rojo indica 0% y el amarillo 100%.

Los resultados se muestran en las figuras 6.1.2 y 6.1.3 para el “found ratio” y el “excess ratio”, respectivamente.

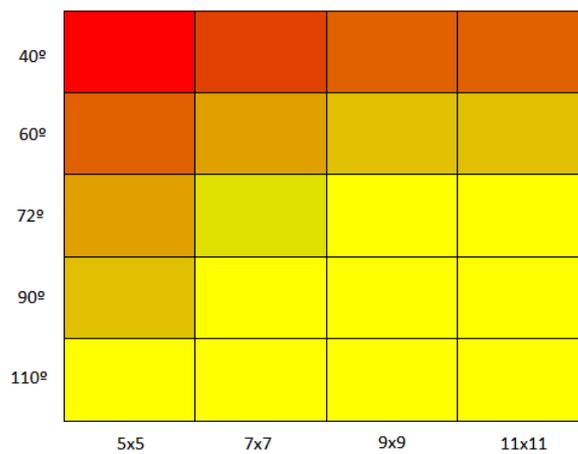


Figura 6.1.2

Valores del found ratio medio %. El máximo valor se alcanza con un área de 11x11 y 110° de ángulo máximo. 87.46% de acierto. Se observa que cuanto mayores sean el área máxima y el ángulo máximo, mayor será el porcentaje de acierto de detección de centros de giros.

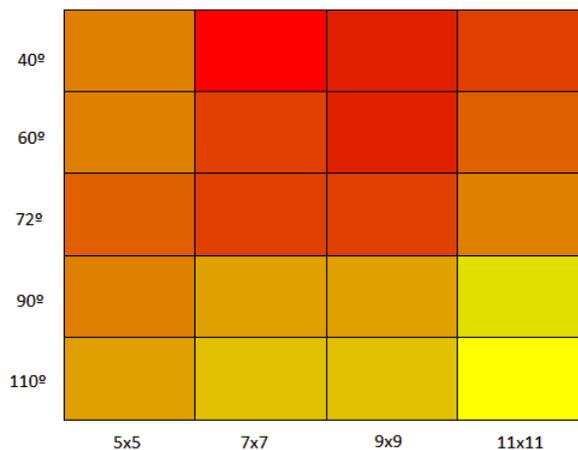


Figura 6.1.3

Valores del *excess ratio* medio %. El máximo valor se alcanza con un área de 11x11 y 110° de ángulo máximo. 27.07% de exceso. Se observa, al igual que en la figura 6.1.3, que cuanto mayores sean el área máxima y el ángulo máximo, mayor será el porcentaje de sobredetección de centros de giros.

Restando el tanto por ciento medio de giros encontrados con el tanto por ciento medio de exceso de detección es posible encontrar los valores de los parámetros para los que el ratio de acierto es más alto con un ratio de exceso más bajo.

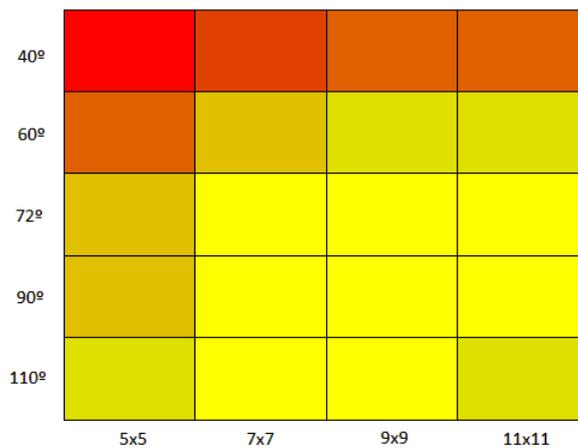


Figura 6.1.4

Valores de la resta del ratio de acierto con el ratio de exceso. El máximo valor se alcanza con un área de 9x9 y 72° de ángulo máximo. 76.75% de aciertos y 6.31% de exceso.

Tal y como se ilustra en la figura 6.1.4, los parámetros que se utilizarán para realizar las pruebas de estimación de la forma de los giros son un área de **9x9** y un ángulo máximo de **72°**.

6.1.1. APRECIACIÓN SOBRE LA DETECCIÓN

Hay que hacer una apreciación sobre los resultados anteriores, y es que aproximadamente el **80%** de los giros no detectados por el método automático son del mínimo tamaño dadas las dimensiones del mapa, es decir de un área de 3x3. Por lo tanto su no detección no es tan grave, ya que se trata de giros de un tamaño muy pequeño. Si se eliminaran estos giros minúsculos de la estadística, el ratio de acierto sería de un **95.35 %**, una mejora sustancial.

Algo similar sucede con el ratio de exceso de detección, ya que aproximadamente el **50 %** de la sobredetección está causada por giros pequeños, quedando si se eliminan un ratio del **3.15%**.

Por otro lado hay que tener en cuenta el error humano ya que algunos de esos giros “sobredetectados” pueden ser realmente giros que el usuario no ha visto y por lo tanto no ha marcado.

Por último, hay que tener en cuenta que existe una amplia frontera entre las estructuras que se pueden considerar giros y las que no. Por lo tanto, es difícil decidir en algunos casos si se trata de un giro o no, incluso para el usuario de la aplicación. Esto hay que tenerlo en cuenta a la hora de valorar los resultados de la detección automática.

6.2. PRUEBAS DE LA CARACTERIZACIÓN MANUAL

La caracterización manual no es perfecta, por dos razones. La primera es que es el usuario quien la realiza y por lo tanto está sujeta a error humano. La segunda es que, como ya se ha mencionado, la caracterización de la forma de los giros por medio de elipses es una simplificación de la misma.

Por lo tanto, y para que las siguientes pruebas de los métodos de estimación de la forma sean más objetivas, se va a comparar las elipses marcadas por el usuario con la forma del campo vectorial. El error se computará comparando el ángulo de la pendiente de la elipse en cada punto con el ángulo del vector coincidente del campo vectorial en dicho punto y luego se calculará la media y la varianza. Los resultados de estas pruebas se muestran en la tabla 6.2.1.

Fecha Mapa	Error Angular con el Campo Vectorial %
01/08/2012	8.26
06/08/2012	7
14/04/2013	10.31
15/04/2013	11.64
16/04/2013	8.26
17/04/2013	14.78
22/10/2013	11.52
23/10/2013	12.68
24/10/2013	11.91
25/10/2013	10.84
26/10/2013	14.71
27/10/2013	9.52
28/10/2013	10.43
29/10/2013	10.02
30/10/2013	9.3

31/10/2013	11.52
Media	10.21
Varianza	16.66

Tabla 6.2.1

Errores de ajuste de las elipses marcadas por el usuario al campo vectorial.

El error angular con el campo vectorial está expresado en %, para su mejor comprensión. Hay que tener en cuenta que en este caso el error máximo de 100% es de 180°.

6.3. PRUEBAS DE LA ESTIMACIÓN POR EL ROTACIONAL

En este apartado se mide el error de la estimación de la forma mediante el método del rotacional y se compara con el error de la detección manual.

Debido a que la estimación por el método del rotacional no genera una elipse, sino un contorno alrededor del centro del giro con muchos grados de libertad, la manera más sencilla y objetiva de compararla es obteniendo su error de la misma forma que en el apartado anterior. Es decir, comparando la pendiente en cada punto del contorno, con el vector de corriente coincidente en ese punto.

Fecha Mapa	Error Angular con el Campo Vectorial %	Diferencia con la Detección Manual %
01/08/2012	18.98	10.72
06/08/2012	17.35	10.34
14/04/2013	22.97	12.65
15/04/2013	23.3	11.65
16/04/2013	14.64	6.37
17/04/2013	16.26	1.47
22/10/2013	20.92	9.4
23/10/2013	17.76	5.07
24/10/2013	20.56	8.64
25/10/2013	22.53	11.68
26/10/2013	18.37	3.66
27/10/2013	29.13	19.6
28/10/2013	21.29	10.85
29/10/2013	20.86	10.83
30/10/2013	17.22	7.92
31/10/2013	25.69	14.17
Media	19.41	9.19

Varianza	56.05	26.88
-----------------	--------------	--------------

Tabla 6.3.1

Errores de adaptación de los contornos de los giros al campo vectorial de corrientes, y la diferencia con los errores obtenidos en el apartado anterior para la detección manual.

Como se puede observar en la tabla 6.3.1, el método del rotacional genera un error medio del **19.41 %** al compararlo con el campo vectorial, y un error medio del **9.19 %** al compararlo con el error de la detección manual.

6.4. PRUEBAS DE LA ESTIMACIÓN POR EL AJUSTE DE ELIPSES

A continuación se muestran los resultados de las pruebas del método de estimación por el ajuste de elipses al campo vectorial.

En este caso sí se puede hacer una comparación con la detección manual ya que se trata de medir el error entre dos elipses (en cada giro). Para ello se ha utilizado el módulo de comparación de resultados, exponiendo los indicadores que se generan, cuyo significado se explicó en el capítulo de diseño.

Fecha Mapa	Error Proporciones Radios	Error de Tamaño	Error Angular Raw %	Error Angular Perceptible %	Error Global
01/08/2012	0.11	0.03	43.91	6.93	0.084
06/08/2012	0.23	0.03	25.47	7.94	0.13
14/04/2013	0.268	0.021	40.74	24.77	0.22
15/04/2013	0.22	0.021	34.12	19.94	0.18
16/04/2013	0.16	0.03	18.94	4.37	0.08
17/04/2013	0.32	0.033	36	23.05	0.23
22/10/2013	0.16	0.013	33.01	11.7	0.11
23/10/2013	0.19	0.015	28.43	14.31	0.14
24/10/2013	0.19	0.015	33.67	6,74	0.1
25/10/2013	0.36	0.04	48.19	30.43	0.29
26/10/2013	0.12	0.02	25.62	7.72	0.09
27/10/2013	0.24	0.025	19.6	4.69	0.11
28/10/2013	0.15	0.03	22.39	5.93	0.09
29/10/2013	0.2	0.061	29.27	17.2	0.17

30/10/2013	0.18	0.03	20.16	6.52	0.1
31/10/2013	0.16	0.024	40.37	10.37	0.11
Media	0.2	0.027	31.24	12.66	0.13
Varianza	0.0058	0.00014	76.81	61.49	0.0061

Tabla 6.4.1

Indicadores generados con el módulo de comparación de resultados para cada mapa.

En la tabla 6.4.1 se puede observar como los indicadores más importantes: El error entre las proporciones de los radios y el error angular perceptible son muy bajos.

El error entre las proporciones de los radios es un indicador no porcentual, y no tiene un tope que se pueda considerar un error máximo. Por lo tanto, que el error sea de **0.2** es un indicativo de cuán cercanas están las proporciones de los radios manualmente marcados con las detectadas por la estimación automática.

El error angular perceptible es de un **12.66 %**. Un error bastante aceptable si se tiene en cuenta que, como se mencionó anteriormente, la detección manual no es perfecta.

En la tabla 6.4.2 se exponen los errores angulares del ajuste de las elipses al campo vectorial como se hizo en el apartado 6.3 con los contornos generados por el método del rotacional.

Fecha Mapa	Error Angular con el Campo Vectorial %	Diferencia con la Detección Manual %
01/08/2012	9.971	1.711
06/08/2012	7.74	0.74
14/04/2013	11.85	1.54
15/04/2013	11.85	0.21
16/04/2013	12.28	4.02
17/04/2013	12.2	-2.58
22/10/2013	14.36	2.84
23/10/2013	9.98	-2.7
24/10/2013	16.01	4.1
25/10/2013	15.17	4.33
26/10/2013	13.48	-1.23
27/10/2013	11.83	2.31
28/10/2013	11.11	0.68
29/10/2013	9.55	-0.47
30/10/2013	9.25	-0.05
31/10/2013	14.36	2.84
Media	11.93	1.72
Varianza	5	2.96

Tabla 6.4.2

Errores de adaptación de las elipses de los giros al campo vectorial de corrientes, y la diferencia con los errores obtenidos para la detección manual.

Como se puede observar en la tabla 6.4.2, en algunos mapas, la detección automática supera a la manual en cuanto a adaptación al campo vectorial. Sin embargo la diferencia de las medias resulta de un **1.71 %**, es decir, menor que la del rotacional que fue de un **9.19%**.

Se observa por tanto cómo la estimación de la forma por el método del ajuste de elipses supera el método basado en el rotacional y que, por esa razón, es el método al que se accede mediante la interfaz gráfica.

Por otro lado, en los casos en los que la estimación automática supera a la manual, los resultados de la tabla 6.4.1 hubieran sido mejores, ya que la caracterización manual no se ha conseguido adaptar mejor al campo vectorial.

6.5. PRUEBAS EN OTRA REGIÓN OCEÁNICA

En este apartado se muestran algunas pruebas realizadas con el método de ajuste de elipses sobre una región oceánica situada al sur de la costa de California, que abarca desde la longitud -119.5 hasta la -117.5 y desde la latitud 32.5 hasta la 34.5. Estas pruebas no se evaluarán numéricamente debido a que se trata de una zona con pocos giros y no muy bien definidos, y por lo tanto la eficacia de los métodos no se puede juzgar de forma objetiva. Los resultados se muestran con las figuras desde la 6.5.1 hasta la 6.5.4.

EJEMPLO 1

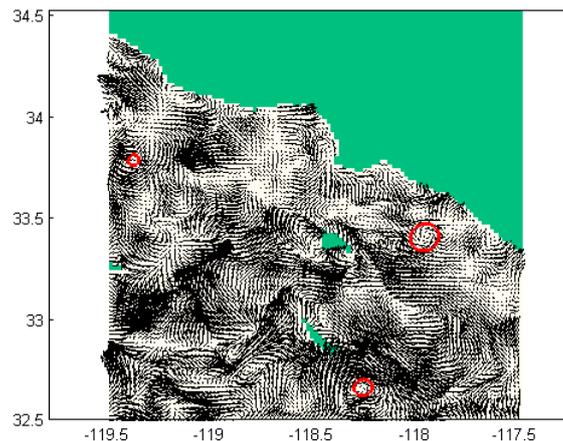


Figura 6.5.1

25-11-2012

EJEMPLO 2

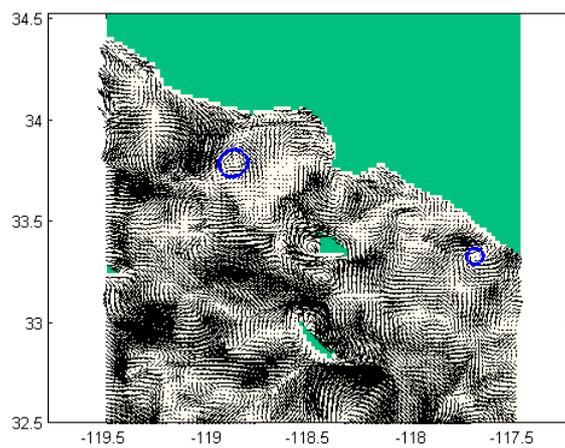


Figura 6.5.2

23-11-2012

EJEMPLO 3

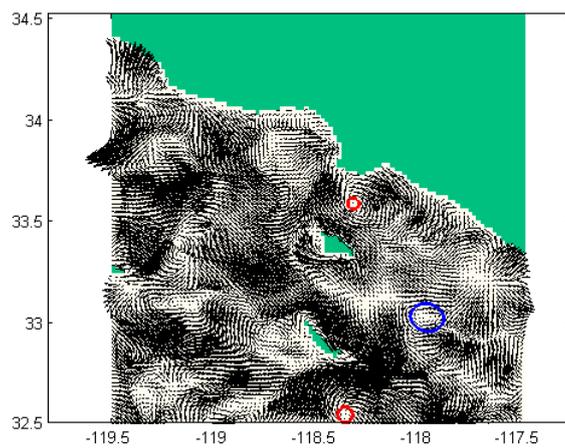


Figura 6.5.3

22-11-2012

EJEMPLO 4

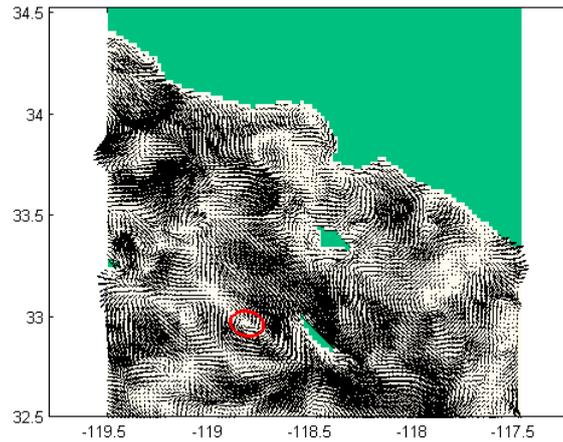


Figura 6.5.4

21-11-2012

6.6. COMPARACIÓN VISUAL

A continuación mediante las figuras desde la 6.5.1 hasta la 6.5.12, se muestran algunos ejemplos de imágenes de giros comparando el marcado manual con ambas estimaciones automáticas de la forma, para tener un cuadro visual con el que, aunque no de forma tan objetiva como la numérica, evaluar los resultados de los métodos.

EJEMPLO 1

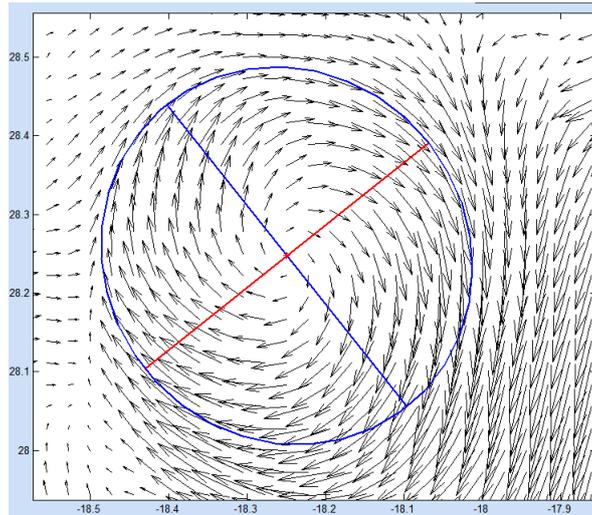


Figura 6.6.1

Giro marcado manualmente. Se observa cómo se puede representar perfectamente mediante una elipse.

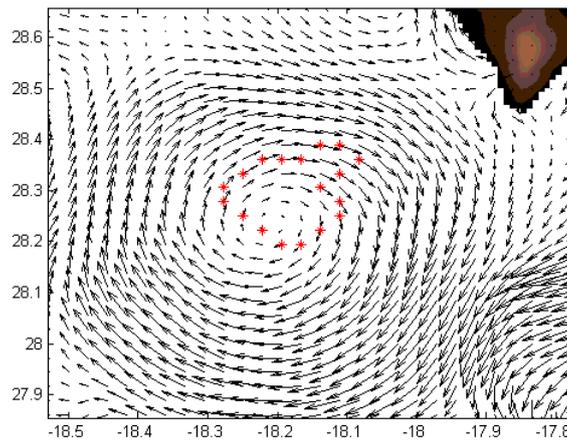


Figura 6.6.2

Contorno obtenido mediante el método del rotacional. No es un resultado perfecto, pero se podría considerar aceptable en cuanto a forma, aunque muy deficiente en cuanto a tamaño.

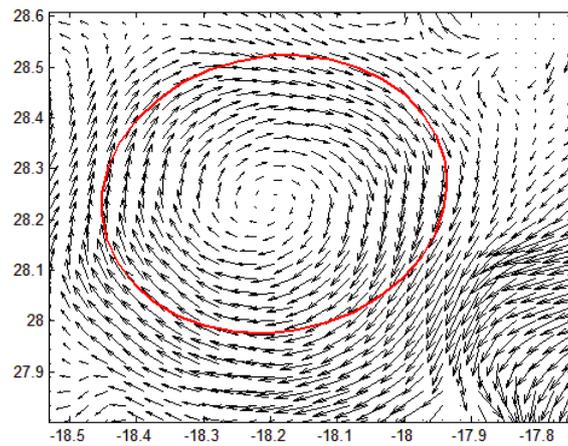


Figura 6.6.3

Elipse obtenida mediante el método de ajuste de elipses. Se observa un resultado muy bueno, quizás incluso superior al marcado manual de la figura 6.5.1.

EJEMPLO 2

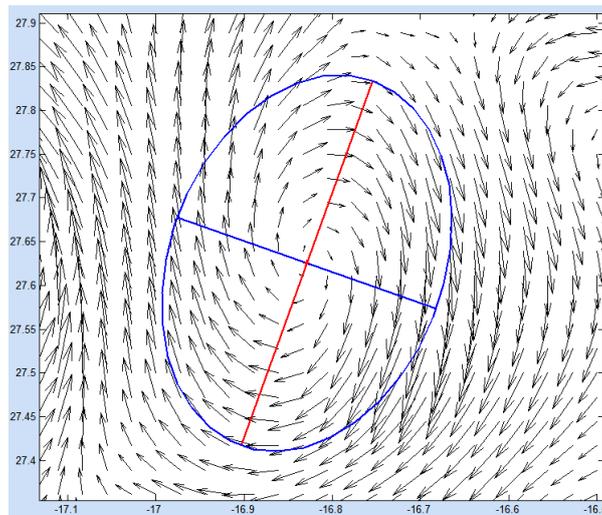


Figura 6.6.4

Giro marcado manualmente. En este caso puede ser representado por una elipse con bastante acierto, aunque no es un resultado totalmente perfecto.

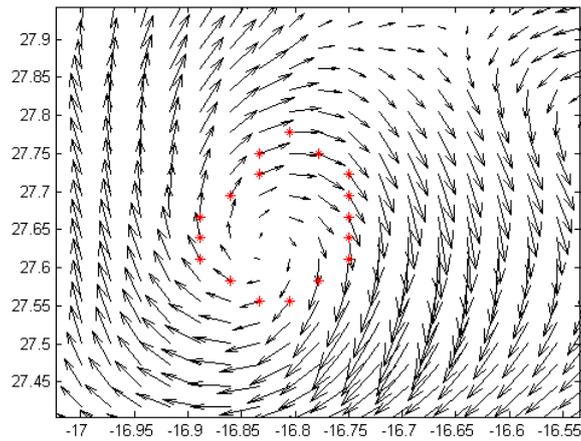


Figura 6.6.5

Contorno obtenido mediante el método del rotacional. En cuanto a forma es un resultado aceptable, pero no en cuanto a tamaño.

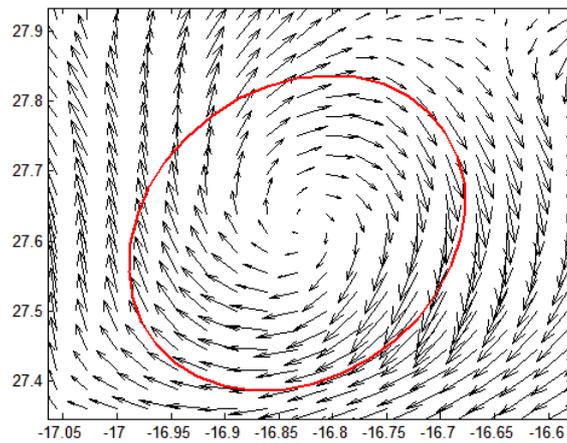


Figura 6.6.6

Resultado obtenido por el método de ajuste de elipses. Se observa un resultado muy similar al marcado manual.

EJEMPLO 3

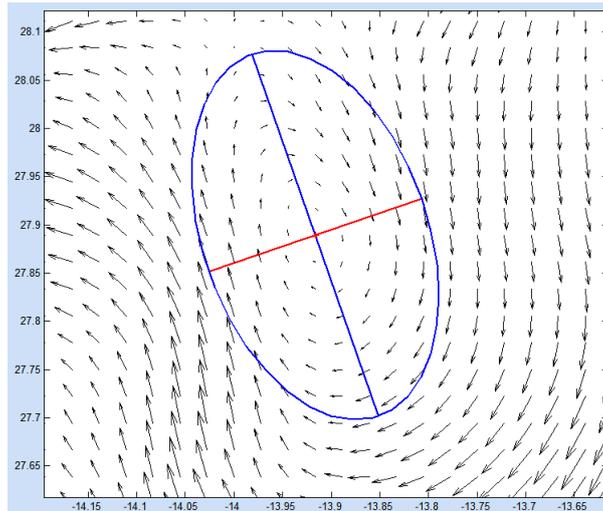


Figura 6.6.7

Giro marcado manualmente. De nuevo puede ser representado casi perfectamente por medio de una elipse.

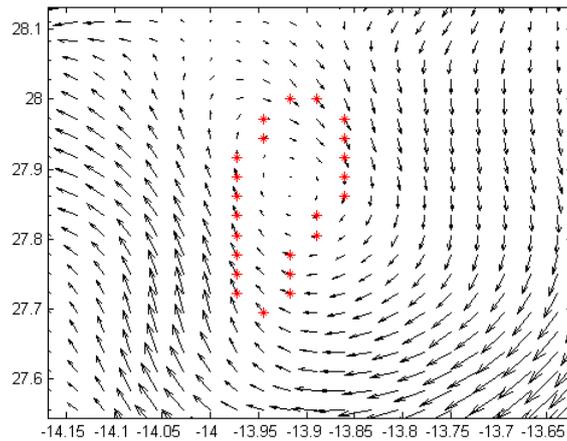


Figura 6.5.8

Contorno obtenido mediante el método del rotacional. Se observa cómo hay un saliente erróneo en el contorno, debido a la propia naturaleza del rotacional.

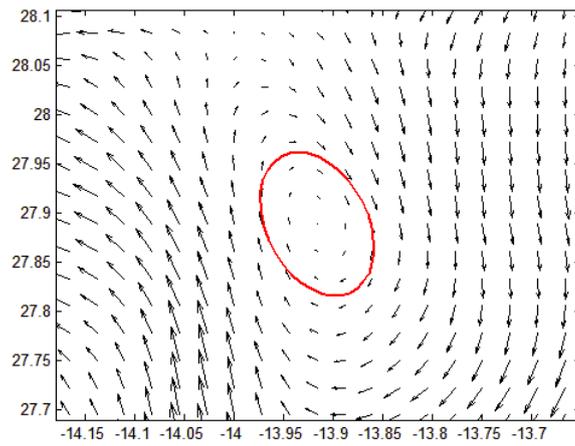


Figura 6.6.9

Elipse obtenida con el método de ajuste de elipses. Se observa una forma adecuada, pero la estimación del tamaño se queda un poco corta.

EJEMPLO 4

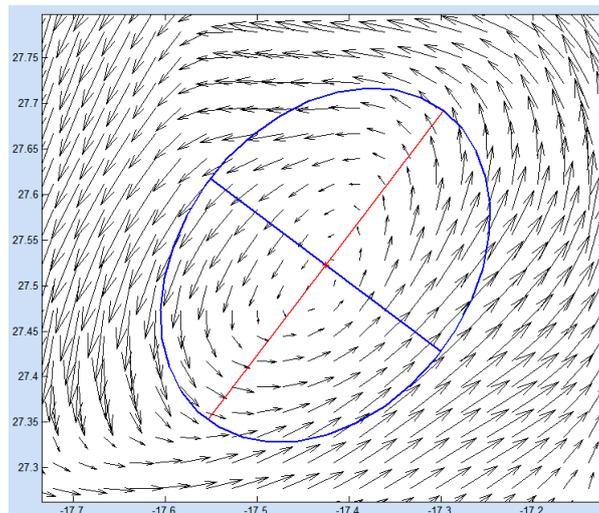


Figura 6.6.10

Giro marcado manualmente. Se observa como de nuevo una elipse es suficiente para representar al mismo.

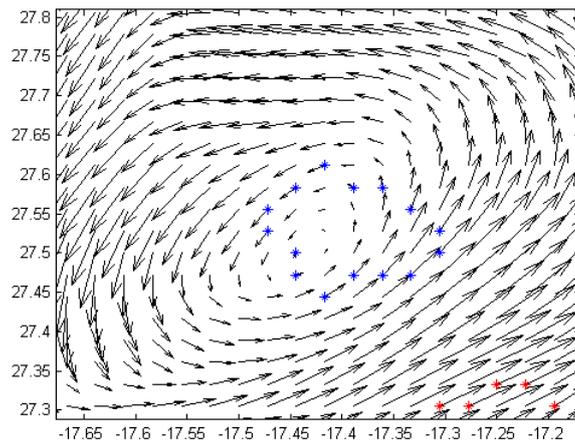


Figura 6.6.11

Contorno obtenido mediante el método del rotacional. Un resultado de nuevo deficiente.

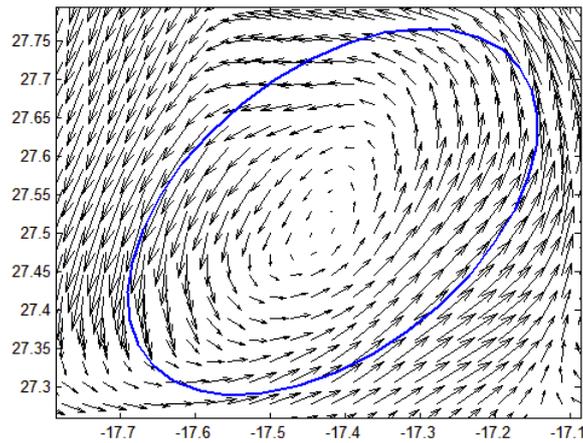


Figura 6.6.12

Elipse obtenida mediante el método de ajuste de elipses. Se observa un gran parecido al marcado manual.

7. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

7.1. CONCLUSIONES

El proyecto ha concluido habiendo conseguido los objetivos que se marcaron a su inicio.

Se ha conseguido desarrollar una herramienta con la que un usuario puede de forma sencilla caracterizar giros en 4 dimensiones y visualizar su tiempo de vida. Estos datos se pueden tanto cargar desde archivo como ser guardados.

Por otro lado, se ha diseñado un método automático de detección y estimación de la forma de los giros de una eficacia aceptablemente elevada, a la luz de las pruebas realizadas.

7.2. TRABAJO FUTURO

Hay varias formas en el que el proyecto podría ser mejorado, y a continuación se exponen algunas de ellas.

Caracterización Manual

Como se ha visto, representar giros por medio de elipses es bastante efectivo, sin embargo, se podría llegar a obtener una mayor eficacia utilizando algunas formas más complejas como por ejemplo los óvalos, o dejar la máxima libertad al usuario para que marque el contorno del giro.

Por supuesto una mayor sofisticación en el marcado manual, conlleva un mayor tiempo empleado en el mismo por el usuario, así como una elevada complejidad a la hora de la utilización de los datos.

Caracterización Automática

El operador rotacional se ha demostrado insuficiente, al menos con el método desarrollado en el proyecto, para estimar la forma de los giros. Un trabajo futuro podría ser mejorar las formas de utilizar dicho operador o usar algún otro que pudiera garantizar unos mejores resultados.

Por otro lado, la estimación por el método de ajuste de elipses se podría mejorar siguiendo la misma idea pero, como se mencionó anteriormente, usando formas más complejas como las oválicas que pudieran adaptarse mejor al campo vectorial y por tanto a la forma dinámica de los giros.

9. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

[Artal - 2010] Osvaldo Artal, “Detección y caracterización de filamentos de surgencia en la zona norte de Chile”, 2010.

[Hernandez - 2013] Daniel Hernandez, Ryan Smith, Enrique Fernandez, Josep Isern, Jorge Cabrera, Antonio Dominguez y Victor Prieto, “Glider Path-Planning for Optimal Sampling of Mesoscale Eddies”, EUROCAST, 2013, Las Palmas de G. C.

Guillaume Lapeyre and Patrice Kein, “Impact of the small-scale elongated filaments on the oceanic vertical bump”, Journal of Marine Research, 2006, volumen 65, 835-851.

J.C McWilliams, F. Colas y M.J Molemaker, “Cold filamentary identification and oceanic surface convergence lines”, Geophysical Reserch Letters, 2009, volumen 36.

[Nencioli - 2010] Francesco Nencioli, Changming Dong, Tommy Dickey, Libe Washburn y James C. McWilliams, “A Vector Geometry–Based Eddy Detection Algorithm and Its Application to a High-Resolution Numerical Model Product and High-Frequency Radar Surface Velocities in the Southern California Bight”, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2005, volumen 27, 564–579.

Stuart Robinson – “Discovering the Ocean from Space: The unique applications of satellite oceanography”, 2010.

Angelo Rubino – “Fluctuating mesoscale frontal features: structures and manifestations in the real ocean”, Universidad de Hamburgo, 2005.

[Talley-2011] Lynne D. Talley, George L. Pickard, William J. Emery, James H. Swift - “Descriptive Physical Oceanography”, Elsevier, 2011.

<http://scientiamarina.revistas.csic.es/index.php/scientiamarina/article/view/1382/1486>

<http://venus.unive.it/rubino/paper/habil05.pdf>

<http://books.google.es/books?id=Chb14jomm08C&printsec=frontcover&dq=physical+oceanography&hl=es&sa=X&ei=50GSUtTMluWO7QbP84D4Dg&ved=0CDoQ6AEwAQ#v=onepage&q&f=true>

http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-540-68322-3_4#page-1

http://www.uni-hamburg.de/ihf/fronts_e.pdf

<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.2153-3490.1956.tb01198.x/pdf>

<http://www.whoi.edu/main/topic/currents--gyres-eddies>

[http://www.cazatormentas.net/foro/temas-de-meteorologa-general/los-'eddies'-\(remolinos\)-y-el-plancton-impresionante-fenomeno/](http://www.cazatormentas.net/foro/temas-de-meteorologa-general/los-'eddies'-(remolinos)-y-el-plancton-impresionante-fenomeno/)

http://www.uni-hamburg.de/ihf/fronts_e.pdf

<http://www.myroms.org/>

http://www.erevistas.csic.es/ficha_articulo.php?url=oai:scientiamarina.revistas.csic.es:article/1382&oai_iden=oai_revista326

http://en.wikipedia.org/wiki/Global_climate_model

<http://www.essc.psu.edu/genesis/ocean.html>

http://centrodeartigos.com/articulos-educativos/article_14000.html

http://iod.ucsd.edu/~falk/roms_class/shchepetkin04.pdf

<http://www.delimar.biz/es/book/export/html/54>

<http://www.met.igp.gob.pe/modelos/modelos.html>

<http://cioss.coas.oregonstate.edu/eddies/>

http://www7.uc.cl/sw_educ/geo_mar/html/h722.html

ANEXO – DETALLES DEL USO DEL SISTEMA

En este apartado se explican algunas características del sistema que el usuario ha de tener en cuenta a la hora de utilizar la aplicación:

1. Los ficheros de mapas que el usuario quiera inicialmente cargar han de contener al menos las siguientes variables con los mismos nombres:
 - mUVZH: Estructura con los campos “u” y “v”, que contienen las componentes de los vectores del mapa en 4 dimensiones.
 - lons: Longitudes del mapa.
 - lats: Latitudes del mapa.
2. Los ficheros guardados mediante el uso de la aplicación tendrán el formato “.mat” y contendrán las variables descritas en el primer punto con la adición de **manual_eddy_map_info**; un array en el que cada elemento es una estructura con los siguientes campos:
 - t: Instante de tiempo en el que se ha guardado la información de los giros.
 - eddies: Array que contiene la información de cada giro del mapa en el instante “t”.
3. Cada vez que se quiera visualizar en la aplicación la caracterización automática, se generará un archivo “.mat” con la información de los giros en el instante de tiempo y profundidad en la que fue invocada con el formato **automatic_ellipse_[profundidad]_[tiempo]**.
4. Es posible modificar los parámetros de la caracterización automática modificando los valores mediante los dos cuadros de texto editables de la interfaz gráfica.
5. Tanto las caracterizaciones automáticas como el seguimiento de la vida de los giros pueden ser realizados directamente invocando a las funciones sin pasar por la interfaz gráfica. Las funciones son:
 - eddy_shape_ellipse_detection: caracterización automática por el método de ajuste de elipses.
 - eddy_shape_curl_detection: caracterización automática por el método del rotacional.
 - eddy_track: seguimiento de los giros.