

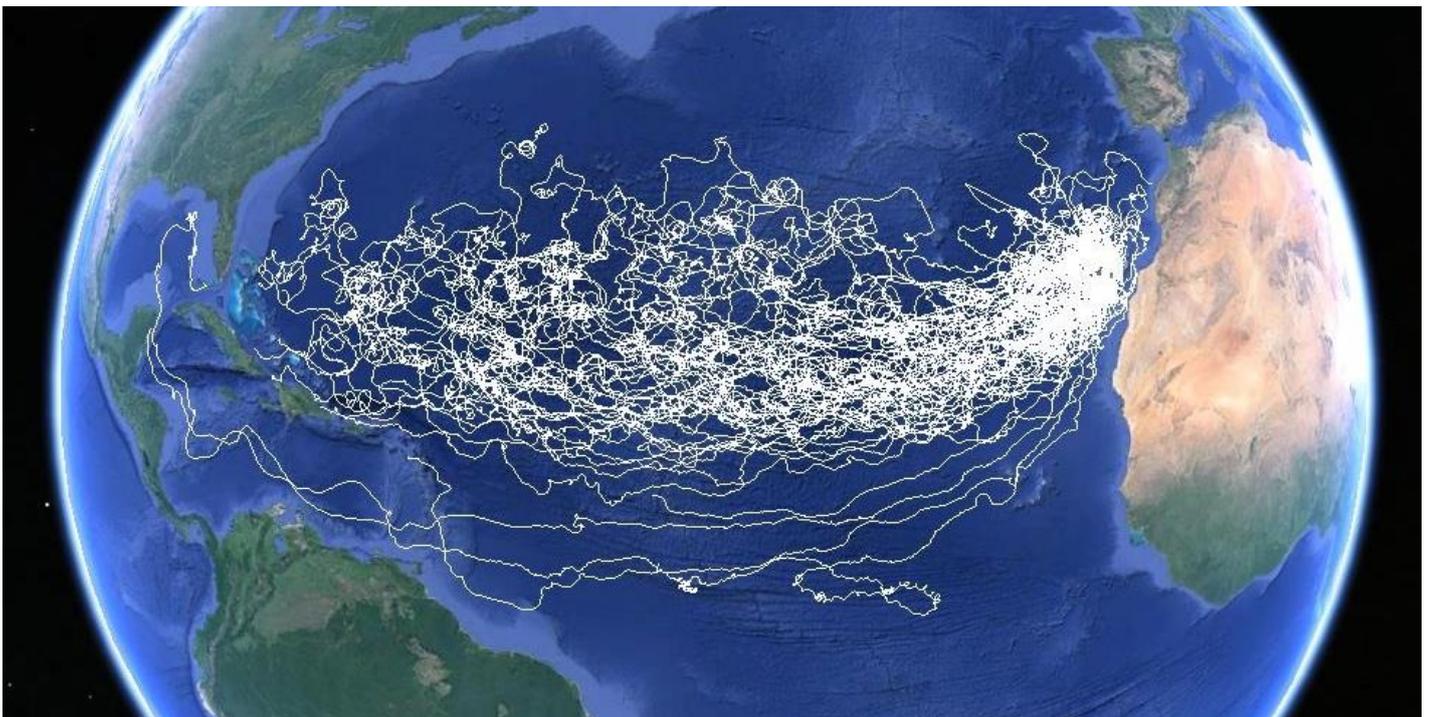


UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS
DE GRAN CANARIA

Departamento de Física

Tesis Doctoral

**ESTUDIO DE LA CORRIENTE SUPERFICIAL EN
CANARIAS MEDIANTE EL SEGUIMIENTO
DE BOYAS DE DERIVA**



Laura Cardona Díaz

Las Palmas de Gran Canaria

Noviembre de 2015



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS
DE GRAN CANARIA

UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA

Programa de doctorado Física, Matemáticas, Geología y Clima.

Departamento de Física

**ESTUDIO DE LA CORRIENTE SUPERFICIAL EN CANARIAS MEDIANTE
EL SEGUIMIENTO DE BOYAS DE DERIVA**

Tesis Doctoral presentada por D^a Laura Cardona Díaz

Dirigida por la Dra. D^a. Esther Pérez Martell

Codirigida por el Dr. D. Octavio Llinás González

La Directora,

(firma)

El Codirector,

La Doctoranda,

(firma)

Las Palmas de Gran Canaria, a 10 de noviembre de 2015

*A la memoria de mi madre,
por su fortaleza y gran corazón.*

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a los doctores Esther Pérez Martell y Octavio Llinás González, directores de esta Tesis, el apoyo científico recibido que me ha permitido desarrollar este trabajo.

Mi agradecimiento a los compañeros del Departamento de Oceanografía del Instituto Canario de Ciencias Marinas, por la colaboración y ayuda prestada durante los años que trabajamos juntos. Agradecer también a los compañeros de La Plataforma Oceánica de Canarias, con los que he estado trabajando en esta última etapa. Un agradecimiento especial a la Dra. María José Rueda López, coordinadora de programas del Instituto Canario de Ciencias Marinas, por su apoyo durante todos estos años.

Este trabajo se ha desarrollado en el marco de un proyecto de cooperación internacional con el *Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory/National Oceanic and Atmospheric Administration* (AOML/NOAA), como parte del *Global Drifter Program* (GDP) para el estudio de las corrientes superficiales. Agradecer al *Data Assembly Center* (DAC) el suministro de las boyas y el servicio de datos.

Durante el desarrollo de este trabajo he realizado estancias en otros centros, lo que me ha permitido adquirir experiencias y conocimientos para avanzar en este proyecto de tesis. Por ello quiero agradecer a los compañeros del Laboratorio de Ambiente Marino y Tecnología (LAMTec) de la Universidad de Azores, su grata acogida durante mi estancia. Al igual que al personal del Departamento del Área de Medio Físico de Puertos del Estado.

Un agradecimiento muy especial al subteniente José Manuel Amat García y al brigada Víctor Marcos Delgado, así como al resto del personal del Centro Coordinador de Rescates de Canarias (RCC-Canarias) y del 802 Escuadrón de Salvamento y Rescate de las Fuerzas Aéreas. Gracias a su colaboración hemos podido conocer un poco más los mares que nos rodean.

Y por último quiero agradecer a mi familia y amigos su cariño y apoyo, en especial a Antonio y a Beatriz. Gracias por estar siempre ahí.

ÍNDICE GENERAL

I. ÍNDICE DE FIGURAS.....	I
II. ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
0. OBJETIVOS Y CONTENIDO DE LA TESIS.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	5
1.1. Historia y evolución de las boyas de deriva.....	5
1.2. Estandarización.....	9
1.3. Comportamiento físico de la boya.....	12
2. CARACTERÍSTICAS OCEANOGRÁFICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	16
2.1. Corriente de Canarias.....	18
2.2. Estructura vertical de las masas de agua.....	23
2.3. Afloramiento del Noroeste de África.....	26
2.4. Fenómenos de mesoescala.....	29
2.5. Estación Europea de Series Temporales Oceánicas de Canarias- ESTOC.....	33
3. MATERIAL Y MÉTODOS.....	37
3.1. Boyas de deriva.....	37
3.1.1. Descripción de la serie de datos.....	37
3.1.2. Despliegue en el medio marino.....	42
3.1.3. Especificaciones técnicas de las boyas.....	46
3.1.4. Transmisión de los datos vía satélite.....	50
3.1.5. Tratamiento de los datos.....	52

3.1.5.1.	Control de calidad.....	53
3.1.5.2.	Interpolación temporal y análisis de error.....	55
3.2	Datos de Satélite.....	57
3.2.1.	Datos de viento.....	57
3.2.2.	Datos de corriente geostrófica.....	58
3.2.3.	Sistema de Monitorización- SIMOM.....	60
3.3.	Modelos numéricos.....	64
3.3.1.	Modelo LAMTec.....	65
3.3.2.	Modelo MyOcean.....	68
4.	ANÁLISIS DE LOS DATOS DE LAS BOYAS.....	71
4.1.	Estudio descriptivo.....	71
4.2.	Análisis temporal.....	72
4.3.	Análisis espacial.....	73
4.4.	Análisis espectral.....	77
5.	RESULTADOS.....	79
5.1.	Descripción de las trayectorias.....	82
5.1.1.	Principales rutas.....	82
5.1.2.	Zonas de impacto.....	84
5.1.3.	Presencia de remolinos.....	85
5.1.4.	Ejercicios de dispersión.....	93
5.2.	Análisis temporal.....	104
5.2.1.	Estadísticas anuales y mensuales.....	104
5.3.	Análisis Espacial.....	108
5.3.1.	Mapas estacionales.....	110
5.3.2.	Mapa del flujo medio de la corriente.....	120

5.4. Correlación boya-viento-corriente.....	128
5.5. Valoración de los modelos numéricos.....	132
5.5.1. Modelo de LAMTec.....	132
5.5.2. Modelo MyOcean.....	138
6. APLICACIONES	145
6.1. Herramienta de apoyo a la oceanografía operacional.....	147
6.1.1.Descripción de la herramienta estadística.....	150
6.1.2. Actuación en casos de accidentes reales.....	152
6.1.3. Ejercicios prácticos con Salvamento.....	160
7. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN.....	171
8. BIBLIOGRAFÍA.....	175
9. ANEXO DE PUBLICACIONES.....	198

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Evolución del despliegue de boyas de deriva como parte del <i>Global Drifter Program</i> (GDP)...	6
Figura 1.2. Estado del Programa Global de Drifters en octubre de 2015.....	8
Figura 1.3. Esquema de la boya de deriva del Programa de Velocidad Superficial (SVP).....	10
Figura 1.4. Escala espacio temporal de los procesos oceánicos (Nieto Saavedra (2009) modificada de Chelton, 2001).....	13
Figura 1.5. Efecto del viento sobre la deriva de botes salvavidas considerando diferentes sistemas de lastre (Allen and Plourde, 1999).....	15
Figura 2.1. Circulación a gran escala adaptada por Mittelstaedt (1991) y Stramma et al. (2005).....	18
Figura 2.2. Circulación superficial en el Atlántico Norte por Klein y Siedler (1989) en verano.....	21
Figura 2.3. Circulación superficial en el Atlántico Norte por Klein y Siedler (1989) en invierno.....	21
Figura 2.4. Masas de agua en el Océano Atlántico Oriental (Pickard y Emery, 1982).....	23
Figura 2.5. Profundidad de la capa de mezcla para el periodo 1995-2000 obtenida por el criterio de Levitus (1982) $\Delta T=0.5^{\circ}\text{C}$ (Cianca, 2003).....	24
Figura 2.6. Esquema del proceso de afloramiento. Relación del viento, el transporte de Ekman y el afloramiento de las aguas subsuperficiales. Imagen del PFEL/NOAA.....	26
Figura 2.7. Distribución de temperatura superficial del mar (superior) y concentración de clorofila a (inferior) observada desde satélite (MODIS/NASA), correspondiente al mes de agosto de 2005 (Pérez-Marrero et al., 2005).....	27
Figura 2.8. Desplazamientos de las isopícnas asociados a los tres tipos de remolinos. Se representan dos superficies de densidad, uno en la termoclina estacional ρ_1 y otro en la termoclina permanente ρ_2 (McGillicuddy et al., 1999).....	30
Figura 2.9. Trayectoria de remolinos de larga duración (más de seis meses) obtenidos a partir de 14 años de datos del altímetro (1992-2006). Se identifican en azul las estructuras ciclónicas y en rojo las anticiclónicas. Sangrá et al. (2009).....	31
Figura 2.10. Mapa donde se identifica la zona de formación de remolinos ciclónicos (azul) y anticiclónicos (rojo). García Weil et al. (2006).....	32
Figura 2.11. Mapa de la localización geográfica de la estación ESTOC (www.estoc.es).....	33
Figura 2.12. Imagen de SeaWIFS de la concentración de clorofila (a) acumulada para el periodo 1997-2006. Se identifican la estación ESTOC y BATS. Cianca et al. (2007).....	34
Figura 2.13. Boya mete-oceanográfica fondeada en la estación ESTOC.....	35
Figura 2.14. Mapa de la velocidad superficial para el océano global obtenido de datos de boyas de deriva (Lumpkin y Johnson, 2013).....	36
Figura 3.1. Tiempo de operatividad en meses de las boyas desplegadas.....	39
Figura 3.2. Distribución del número de boyas desplegadas por años.....	40

Figura 3.3. Distribución del número de boyas desplegadas por meses.....	40
Figura 3.4. Número de registros y de días para la serie completa y para la serie teniendo en cuenta solo la draga operativa.....	41
Figura 3.5. Número de boyas desplegadas desde las diferentes plataformas usadas, marítimas y aéreas....	43
Figura 3.6. Porcentaje de despliegues en relación al tipo de embarcación o aeronave usado.....	43
Figura 3.7. Fotos durante el despliegue de varias de las boyas de deriva desde embarcaciones.....	44
Figura 3.8. Fotos durante el despliegue de varias de las boyas de deriva desde helicópteros del Servicio Aéreo de rescates del Ejército del Aire.....	45
Figura 3.9. Esquema de la boya original y el nuevo modelo mini de boya de deriva.....	46
Figura 3.10. Foto de una de las boyas de deriva antes del despliegue.....	47
Figura 3.11. Foto de una boya de deriva con la draga desplegada.....	48
Figura 3.12. Foto de la boya de deriva desplegada en el agua.....	49
Figura 3.13. Esquema del flujo de datos asociado al <i>Data Assembly Center</i> (DAC).....	51
Figura 3.14. Ejemplo de la lógica de edición de datos erróneos por Hansen y Poulain (1996).....	54
Figura 3.15. Ejemplo ilustrativo de los resultados de interpolación de Hansen y Poulain (1996). “o” representa los datos de posición recibidos del servicio de Argos y las “+” representa los puntos interpolados.....	56
Figura 3.16. Datos de viento a 10 metros de la superficie obtenidos del QUIKSCAT para el día 7 de agosto de 2002.....	58
Figura 3.17. Datos de corriente geostrófica obtenido del altímetro de AVISO para el día 7 de agosto de 2002.....	59
Figura 3.18. Ejemplo de la integración de datos obtenidos de SIMOM. Viento (flechas rojas), la velocidad de la corriente geostrófica (flechas blancas). Pérez-Marrero (2005).....	61
Figura 3.20. Ejemplo de los datos extraídos mediante SIMOM. El viento (azul) y la corriente geostrófica (rojo) para cada instante de la boya (negro).....	62
Figura 3.19. Gráfica de los promedios diarios y semanales obtenidos para una de las boyas de deriva.....	63
Figura 3.20. Altura dinámica absoluta (color) y corriente geostrófica (vector) de la superficie. Juliano, (2003).....	66
Figura 3.21. Resultados del modelo WAVEWATCH III para una simulación realizada para todo el Atlántico, donde se observa la altura dinámica en metros (color) y la dirección de propagación del oleaje (vector).www.lamtec-id.com.....	67
Figura 3.22. Mapa global de la cobertura que ofrece el modelo MyOcean. Los números indican los submodelos por regiones. Nuestra zona es encuentra en el submodelo 5, denominado zona IBI (Iberia, Bizkaia, Irlanda).....	68
Figura 4.1. Distribución del número de observaciones de boyas por meses.....	72

Figura 4.2. Distribución del número de observaciones de boyas por año.....	72
Figura 4.3. Delimitación de la zona de estudio en torno al Archipiélago Canario.....	73
Figura 4.4. Delimitación de la zona de estudio dividida en cuadrículas de 1°x1°.....	74
Figura 4.5. Velocidad de la corriente media (color en cm/s) y líneas de corriente (líneas negras), obtenidas de los datos de las boyas de deriva para todo el océano. En el recuadro superior de la izquierda se muestra el histograma de la corriente media (eje horizontal en cm/s de 0 a 100). Lumpkin y Johnson (2013).....	76
Figura 5.1. Trayectorias de las 130 boyas de deriva desplegadas durante el periodo 1998-2012.....	79
Figura 5.2. Trayectorias de las boyas con la draga operativa durante el periodo 1998-2012.....	80
Figura 5.3. Temperatura superficial del mar para todo el Atlántico medido por las boyas de deriva.....	81
Figura 5.4. Temperatura superficial del mar medido por las boyas de deriva en el archipiélago Canario...	81
Figura 5.5. Trayectorias de todas las boyas de deriva desplegadas en la estación ESTOC. En rojo se marcan las principales rutas tomadas por las boyas. La línea continua marca las tres principales rutas y la línea discontinua marca las rutas secundarias.....	82
Figura 5.6 Identificación de las zonas de costa donde han impactado las boyas de deriva.....	84
Figura 5.7. Trayectorias de dos boyas de deriva que impactan en la costa oeste de la isla de La Palma.....	84
Figura 5.8. Identificación de remolinos ciclónicos (C) y anticiclónicos (A). El vector indica la dirección de desplazamiento y la línea discontinua la trayectoria seguida.....	85
Figura 5.9. Trayectoria de la boya 20334, donde se observa la presencia de un remolino al suroeste de la isla de La Palma.....	86
Figura 5.10. Tramo de la trayectoria de la boya 20334 durante el periodo (02/03/00 al 01/04/00). Los números indican el periodo en meses y se identifica el principio y fin del remolino.....	87
Figura 5.11. Velocidad registrada por la boya 20334. Los números indican los meses transcurridos. Se identifica en rojo el periodo en el que estuvo en un remolino anticiclónico.....	87
Figura 5.12. Trayectoria de la boya 20343. Se observa la presencia de un remolino al sur de la isla de La Gomera que posteriormente se desplaza dirección noroeste.....	88
Figura 5.13. Tramo de la trayectoria de la boya 20343 durante el periodo (29/05/2000 al 30/11/2000). Los números indican el periodo en meses y se identifica el principio y fin del remolino.....	88
Figura 5.14. Velocidad registrada por la boya 20343. Los números indican los meses transcurridos. Se identifica en rojo, el periodo en el que estuvo en un remolino anticiclónico al sur de La Gomera.....	89
Figura 5.15. Espectrograma frecuencia - tiempo para la boya 20343.....	90
Figura 5.16. Componente zonal de la velocidad de la boya de deriva 20343.....	90
Figura 5.17. Componente meridional de la velocidad de la boya de deriva 20343.....	91
Figura 5.18. Intensidad de la velocidad de la boya 20343.....	91
Figura 5.19. Espectrograma frecuencia - tiempo para la boya 20334.....	92

Figura 5.20. Trayectorias de las tres boyas de deriva desplegadas el 04/10/2006.....	93
Figura 5.21. Trayectorias de las tres boyas de deriva desplegadas el el 04/10/2006, durante el periodo que tenían operativa la draga.....	94
Figura 5.22. Evolución de la latitud seguida por las tres boyas de deriva desplegadas el 04/11/2006.....	94
Figura 5.23. Evolución de la logitud seguida por las tres boyas de deriva desplegadas el 04/11/2006.....	95
Figura 5.24. Zoom de las trayectorias de las tres boyas de deriva desplegadas el el 04/10/2006.....	95
Figura 5.25. Trayectorias de las cuatro boyas de deriva desplegadas el 19/02/2007.....	96
Figura 5.26. Trayectorias de las cuatro boyas de deriva desplegadas el el 19/02/2007. Las marcas (X) indican las zonas de impacto en la costa de la isla de Tenerife.....	96
Figura 5.27. Evolución de la latitud seguida por las cuatro boyas de deriva desplegadas el 19/02/2007...	97
Figura 5.28. Evolución de la logitud seguida por las cuatro boyas de deriva desplegadas el 19/02/2007..	97
Figura 5.29. Trayectorias de las cuatro boyas de deriva desplegadas el 06/06/2007.....	98
Figura 5.30. Trayectorias de las cuatro boyas de deriva desplegadas el el 06/06/2007. La trayectoria color negro corresponde con la boya que no desplegó la draga e impactó en la costa de Tenerife (marcado con una X).....	99
Figura 5.31. Evolución de la latitud seguida por las cuatro boyas de deriva desplegadas el 06/06/2007....	99
Figura 5.32. Evolución de la longitud seguida por las cuatro boyas de deriva desplegadas el 06/06/2007	100
Figura 5.33. Zoom de las trayectorias de tres boyas de deriva con la draga operativa, desplegadas el el 06/06/2007.....	100
Figura 5.34. Trayectorias de las cuatro boyas de deriva desplegadas el 30/10/2007.....	101
Figura 5.35. Trayectorias de las cuatro boyas de deriva desplegadas el el 30/10/2007, durante el periodo que tenían operativa la draga.....	101
Figura 5.36. Evolución de la latitud seguida por las cuatro boyas de deriva desplegadas el 30/10/2007...	102
Figura 5.37. Evolución de la longitud seguida por las cuatro boyas de deriva desplegadas el 30/10/2007.....	102
Figura 5.38. Ciclo medio anual de la velocidad (cm/s) para los 15 años de datos.....	105
Figura 5.39. Velocidad máxima anual (cm/s) para los 15 años de datos.....	105
Figura 5.40. Ciclo medio mensual de la velocidad (cm/s) para los 15 años de datos.....	106
Figura 5.41. Velocidad máxima mensual (cm/s) para los 15 años de datos.....	106
Figura 5.42. Distribución del número de registros de las boyas de deriva para cada cuadrícula (1°x1°) interpolados mediante un Kriging. Las líneas discontinuas representan las principales rutas.....	108
Figura 5.43. Número de registros para la serie completa distribuidos por estaciones.....	110

Figura 5.44. Número de registros para el área de estudio distribuidos por estaciones.....	110
Figura 5.45. Trayectorias de todas las boyas de deriva para el periodo de enero-febrero-marzo.....	112
Figura 5.46. Velocidades registradas por las trayectorias individuales de las boyas de deriva durante el periodo de enero-febrero-marzo interpoladas mediante un Kriging.....	112
Figura 5.47. Mapa estacional (enero-febrero-marzo) donde se representa el vector medio de la velocidad para cada una de las cuadrículas de 1°x1° para el periodo 1998-2012.....	113
Figura 5.48. Trayectorias de todas las boyas de deriva para el periodo de abril-mayo-junio.....	114
Figura 5.49. Velocidades registradas por las trayectorias individuales de las boyas de deriva durante el periodo de abril-mayo-junio interpoladas mediante un Kriging.....	114
Figura 5.50. Mapa estacional (abril-mayo-junio) donde se representa el vector promedio de la velocidad para cada una de las cuadrículas de 1°x1° para el periodo 1998-2012.....	115
Figura 5.51. Trayectorias de todas las boyas de deriva para el periodo de julio-agosto-septiembre.....	116
Figura 5.52. Velocidades registradas por las trayectorias individuales de las boyas de deriva durante el periodo de julio-agosto-septiembre interpoladas mediante un Kriging.....	116
Figura 5.53. Mapa estacional (julio-agosto-septiembre) donde se representa el vector promedio de la velocidad para cada una de las cuadrículas de 1°x1° para el periodo 1998-2012.....	117
Figura 5.54. Trayectorias de todas las boyas de deriva para el periodo de octubre-noviembre-diciembre.....	118
Figura 5.55. Velocidades registradas por las trayectorias individuales de las boyas de deriva durante el periodo de octubre-noviembre-diciembre interpoladas mediante un Kriging.....	118
Figura 5.56. Mapa estacional (octubre-noviembre-diciembre) donde se representa el vector promedio de la velocidad para cada una de las cuadrículas de 1°x1° para el periodo 1998-2012.....	119
Figura 5.57. Trayectorias de todas las boyas de deriva para el periodo de estudio 1998-2012.....	120
Figura 5.58. Velocidades registradas por las trayectorias individuales de todas las boyas de deriva durante todo el periodo de estudio 1998-2012 interpoladas mediante un Kriging.....	120
Figura 5.59. Mapa del flujo medio para todo el periodo de estudio, 1998-2012. Donde se representa el vector medio para cada una de las cuadrículas de 1°x1°.....	121
Figura 5.60. Velocidad media de la corriente para el periodo 1998-2012 para para cada una de las cuadrículas de 1°x1° interpolado mediante un Kriging.....	122
Figura 5.61. Desviación estándar de la velocidad media de la corriente para el periodo 1998-2012 para para cada una de las cuadrículas de 1°x1° interpolado mediante un Kriging.....	122
Figura 5.62. Número total de registros de boyas de deriva para el periodo 1979-2012 para una resolución de 0.5°x0.5°. Obtenido del Programa Global de Drifters.....	124
Figura 5.63. Mapa del flujo medio de la corriente con una resolución de 0.5°x0.5° para el periodo 1979-2012. Obtenido del Programa Global de Drifters.....	125

Figura 5.64. Velocidad media de la corriente para el periodo 1979-2012. Obtenido del Programa Global de Drifters.....	126
Figura 5.65. Energía cinética de Eddy para el periodo 1979-2012. Obtenida del Programa Global de Drifters.....	126
Figura 5.66. Imagen integrada de viento (vector rojo), corriente geostrófica (vector blanco) y boyas de deriva (línea negra) obtenida de SIMOM para el 03/08/2004.....	128
Figura 5.67. Velocidad zonal de la boya 30316 junto con la velocidad del viento y la velocidad geostrofia.....	129
Figura 5.68. Velocidad meridional de la boya 30316 junto con la velocidad del viento y velocidad geostrofia.....	129
Figura 5.69. Correlación de la velocidad de la boya 30316 con la velocidad de la corriente geostrófica para la componente zonal (izquierda) y meridional (derecha).....	130
Figura 5.70. Trayectoria obtenida del modelo (gris) y de la boya a la deriva (rojo) para el ejercicio del 12/03/2003.....	133
Figura 5.71. Zoom de la trayectoria obtenida del modelo (gris) y de la boya a la deriva (rojo) para el ejercicio del 12/03/2003.....	133
Figura 5.72. Trayectoria obtenida del modelo (gris) y de la boya a la deriva (rojo) para el ejercicio del 06/04/2003.....	134
Figura 5.73. Zoom de la trayectoria obtenida del modelo (gris) y de la boya a la deriva (rojo) para el ejercicio del 06/04/2003.....	134
Figura 5.74. Trayectoria obtenida del modelo (gris) y de la boya a la deriva (rojo) para el ejercicio del 13/06/2003.....	135
Figura 5.75. Zoom de la trayectoria obtenida del modelo (gris) y de la boya a la deriva (rojo) para el ejercicio del 13/06/2003.....	135
Figura 5.76. Trayectoria obtenida del modelo (gris) y de la boya a la deriva (rojo) para el ejercicio del 30/01/2003.....	136
Figura 5.77. Trayectoria obtenida del modelo (gris) y de la boya a la deriva (rojo) para el ejercicio del 16/07/2003.....	137
Figura 5.78. Trayectoria obtenida del modelo (gris) y de la boya a la deriva (rojo) para el ejercicio del 02/08/2003.....	137
Figura 5.79. Mapa de la zona IBI para el modelo MyOcean, donde se presentan las trayectorias de las boyas de deriva para el periodo de abril a diciembre de 2011.....	138
Figura 5.80. Trayectoria de la boya de deriva 71843.....	139
Figura 5.81. Intensidad de la velocidad obtenida por el modelo (azul) y por la boya 71843 (negro)....	140
Figura 5.82. Dirección de vector de velocidad obtenido por el modelo (azul) y por la boya 71843 (negro)	140
Figura 5.83. Representación gráfica del vector de corriente obtenido de la boya de deriva 71843 (negro) y por el modelo (azul). Para la resolución horaria (gr izquierda) y para la resolución diaria (derecha).....	141

Figura 5.84. Trayectoria de la boya de deriva 92905, al norte del a zona IBI.....	142
Figura 5.85. Intensidad de la velocidad obtenida por el modelo (azul) y por la boya 92905 (negro).....	142
Figura 5.86. Dirección de vector de velocidad obtenida por el modelo (azul) y por la boya 92905 (negro).....	143
Figura 5.87. Representación gráfica del vector de corriente obtenido de la boya de deriva 92905 (negro) y por el modelo (azul). Para la resolución horaria (izquierda) y para la resolución diaria (derecha).....	143
Figura 6.1. Delimitación de la zona marítima especialmente sensible. Donde se identifican la ruta occidental (1) y la ruta oriental (2) por donde debe circular el tráfico marítimo.....	145
Figura 6.2. Esquema de un sistema de oceanografía operacional.....	147
Figura 6.3. Campo de vientos a 10 metros de la superficie obtenido desde el satélite QuickScat para el 15 de octubre de 2004.....	152
Figura 6.4. Diagrama de direcciones del registro de datos extraído en torno al punto del accidente.....	153
Figura 6.5. Trayectorias de las 4 boyas de deriva coincidente en el espacio y en el tiempo para el incidente del 15 de octubre de 2004. El punto @ indica el lugar del accidente y FIN indica donde fue localizada la embarcación transcurridas 15 horas.....	154
Figura 6.6. Representación de la posición real del rescate, frente a la posición obtenida del estudio estadístico (trayectoria en azul) y la posición obtenida del modelo numérico (trayectoria marrón).....	155
Figura 6.7. Mapa de predicción de corrientes suministrado por Puertos de Estado para el día del accidente (19/03/2014).....	156
Figura 6.8. Diagrama de direcciones del registro de datos extraído en torno al punto del accidente.....	157
Figura 6.9. Trayectoria de las 2 boyas de deriva que pasaron por la zona del accidente. Boya 44115 (negro) y boya 71116 (azul).....	158
Figura 6.10. Mapa de predicción de corrientes suministrado por Puertos del Estado para el día posterior al accidente (20/03/2014).....	158
Figura 6.11. Mapa donde se observa la deriva del aparato transcurridas las primeras 12 horas desde el incidente (las marcas amarillas indican las posiciones de deriva en función de la hora). Las líneas blancas son las trayectorias de las boyas de deriva en esa zona.....	159
Figura 6.12. Localización y fechas en las que se han realizado ejercicios de simulacro.....	161
Figura 6.13. Sistema de balsa salvavidas usado en los ejercicios de simulacro en coordinación con el Centro Coordinador de Rescates de Canarias.....	161
Figura 6.14. Despliegue de una balsa salvavidas con baliza de posicionamiento por parte del 802 Escuadrón del Ejército del aire.....	162
Figura 6.15. Baliza de posicionamiento que se engancha a la balsa salvavidas en los casos de simulacros de accidentes.....	162

Figura 6.16. Trayectoria real de la balsa a la deriva (azul), trayectoria obtenida por el modelo teniendo en cuenta solo el viento y oleaje (negro) y trayectoria del modelo teniendo en cuenta el viento, oleaje y corrientes (rojo).....	163
Figura 6.17. Resultados en más detalle de la trayectoria real de la balsa a la deriva (azul), trayectoria obtenida por el modelo teniendo en cuenta solo el viento y oleaje (rojo) y trayectoria del modelo teniendo en cuenta el viento, oleaje y corrientes (verde).....	164
Figura 6.18. Trayectoria real de la balsa salvavidas junto con la trayectoria obtenida por el modelo para el ejercicio del 4 de mayo de 2005.....	165
Figura 6.19. Trayectoria real de la balsa salvavidas junto con la trayectoria obtenida por el modelo para el ejercicio del 25 de abril de 2006.....	166
Figura 6.20. Trayectoria real de la balsa salvavidas junto con la trayectoria obtenida por el modelo para el ejercicio del 22 de mayo de 2008.....	167
Figura 6.21. Trayectoria real de la balsa salvavidas junto con la trayectoria obtenida por el modelo para el ejercicio del 28 de julio de 2008.....	168
Figura 6.22. Interfaz gráfica del software PLATEA 4D. Donde se muestra la integración de los datos de corrientes (vectores en azul) y de viento (vectores en blanco) para el 10 de noviembre de 2014.....	169
Figura 6.23. Posición inicial y final de la balsa salvavidas junto con la posición final obtenida por el modelo para el ejercicio del 10 de noviembre de 2014.....	170

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Valores de la intensidad de la Corriente de Canarias obtenidos por diferentes autores.....	19
Tabla 3.1. Distribución por empresas de las 130 boyas de deriva desplegadas.....	37
Tabla 3.2. Estado de cese y operatividad de las 130 boyas desplegadas.....	38
Tabla 3.3. Descripción del formato de los datos suministrados por el <i>Data Assembly Center</i>	52
Tabla 3.4. Institución y acceso a la distribución de los datos de viento y corriente geostrófica.....	57
Tabla 3.5. Cobertura y resolución de los sensores usados para la obtención de los diferente parámetros.....	60
Tabla 5.1. Estadísticas anuales para la serie de datos.....	107
Tabla 5.2. Estadísticas mensuales para la serie de datos.....	107
Tabla 5.3. Estadísticas de los datos registrados por estaciones para el área de estudio.....	111
Tabla 5.4. Estadísticas de la velocidad obtenidos por el modelo MyOcean y por la boya 71843.....	141
Tabla 5.5. Estadísticas de la velocidad obtenidos por el modelo MyOcean y por la boya 92905...	144
Tabla 6.1. Resultados estadísticos de la velocidad para los datos extraídos de la serie para la zona y periodo del accidente.....	153
Tabla 6.2. Resultados de la posición obtenida por el estudio estadístico y el modelo numérico transcurridas 15 horas desde el momento del incidente.....	155
Tabla 6.3. Resultados estadísticos de la velocidad para los datos extraídos de la serie para la zona y periodo del accidente.....	157

0. OBJETIVOS Y CONTENIDO DE LA TESIS

0. OBJETIVOS Y CONTENIDO DE LA TESIS

La tesis presentada se basa en el estudio de la corriente superficial en torno a las Islas Canarias mediante el seguimiento de boyas de deriva. Gracias al gran número de estos dispositivos que se han desplegado en torno al Archipiélago Canario ha sido posible aportar nuevos datos sobre la circulación superficial en esta región.

Este trabajo surge de un proyecto de cooperación internacional con la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) dentro del programa *Surface Velocity Program* (SVP) para la observación de la corriente superficial de los océanos. El proyecto comenzó en 1998 en el Instituto Canario de Ciencias Marinas con el despliegue periódico de boyas de deriva y actualmente continúa operativo con la Plataforma Oceánica de Canarias. Hasta 1998 la zona del Archipiélago Canario y la costa de África tenían una carencia en el número de observaciones de la corriente superficial, debido a la ausencia de boyas de deriva desplegadas en la zona. Esta falta de información ha dificultado la calibración de los satélites de observación en esta región de frecuente e intensa presencia de aerosoles. Gracias a este proyecto de cooperación en los últimos 15 años se han desplegado, en adición al programa general de lanzamientos, más de 130 boyas de deriva. Para entender mejor el comportamiento del océano tenemos que tener la capacidad de observar y medir sus propiedades. En este sentido el despliegue de boyas de deriva de un modo sistemático y durante un largo periodo de tiempo, ha contribuido al aumento del número de observaciones de la corriente superficial.

La Corriente de Canarias ha sido ampliamente estudiada durante años por numerosos grupos de investigación mediante la aplicación de diferentes metodologías, pero el uso de boyas de deriva se ha centrado en el análisis y seguimiento de estructuras mesoescalares de tipo remolino que suceden en esta región. Además, la mayoría de los estudios se han basado en una escala a nivel de la Cuenca de Canarias, o se han centrado en la zona de afloramiento del noroeste de África. El área de trabajo de este estudio, está definida en torno al Archipiélago Canario y con una resolución que nos permita conocer el sistema de corrientes en torno a las islas y en los canales entre ellas.

El objetivo principal es caracterizar la variabilidad espacio-temporal de la corriente superficial (15-20 metros) mediante un análisis descriptivo y estadístico de los datos obtenidos de las boyas de deriva. Desde el punto de vista operacional, se plantea aumentar el número de observaciones de la corriente mediante el despliegue periódico de boyas de deriva, coordinando los medios logísticos y las operaciones necesarias para ello. El tener numerosas boyas operativas al mismo tiempo y durante un largo periodo, ha permitido identificar tendencias de la corriente en ésta zona. Este trabajo presenta como novedad el estudio de una serie de datos de 15 años de observaciones, combinado con análisis estadísticos y modelos numéricos.

Para entender mejor el efecto de las diferentes fuerzas que actúan en la capa superficial del océano, se ha dispuesto de una base de datos de viento y de corriente geostrófica obtenidos mediante información de satélites. El conocer de modo simultáneo el desplazamiento de la boya, el campo de vientos superficial y el de la corriente geostrófica, ayudará a entender las relaciones existentes entre estas variables, que van a ser determinantes en el movimiento de los objetos en la superficie del océano.

Durante el desarrollo de este trabajo se han usado varios modelos numéricos para predecir la trayectoria más probable de un objeto que se encuentre a la deriva. Los datos de las boyas han permitido comparar los resultados obtenidos de dichos modelos, haciendo posible evaluar su grado de concordancia, así como su nivel de adecuación a esta zona que presenta una gran variabilidad oceánica.

La finalidad que se plantea es establecer una herramienta de apoyo a los sistemas de oceanografía operacional combinando la observación, el análisis y la simulación numérica. Los resultados obtenidos de las boyas de deriva que se presentan en esta tesis, han estado disponibles y han servido para asesorar a las instituciones de salvamento en el caso de simulación de accidentes en ejercicios prácticos, así como en el caso de accidentes reales, lo que le da un gran valor añadido a este trabajo de tesis.

La tesis se estructura en los siguientes apartados.

El primero de ellos se corresponde con la **introducción**, donde se va a describir la evolución de las boyas de deriva y los procedimientos de estandarización hasta llegar al modelo actual de boya usado en este trabajo. También se hace una descripción del comportamiento físico de las boyas mediante las ecuaciones que rigen el movimiento en la capa superficial del océano.

El segundo apartado consiste en la descripción de las **características oceanográficas de la zona de estudio**. Para comprender mejor los resultados obtenidos, se hace un repaso bibliográfico de los estudios de la corriente en esta zona, así como de otros fenómenos característicos de esta región, como son el afloramiento de la costa noroeste de África y los fenómenos mesoescalares. También se describe en este apartado la Estación Europea de Series Temporales Oceánicas de Canarias (ESTOC) como proyecto impulsor del presente estudio de corrientes.

El tercer apartado es el de **material y métodos**, donde se presentan las diferentes metodologías llevadas a cabo para la adquisición de los datos, así como una descripción técnica de las boyas de deriva usadas en este trabajo. Como complemento al estudio de la corriente superficial se han usado una serie de datos viento y de corriente geostrofica, en este apartado se explica la obtención y procesado de esos datos. También se describen los dos modelos numéricos de predicción usados en este trabajo.

El apartado cuarto se corresponde con el **análisis de los datos de las boyas**, en donde se explican los diferentes análisis que se realizan a la serie de datos para la caracterización de la corriente superficial en esta región.

En el apartado quinto se presentan los **resultados**. En primer lugar se explican los resultados obtenidos de las boyas de deriva tras los diferentes análisis a los que se somete los datos. Posteriormente se presentan los resultados tras comparar los datos de las boyas de deriva con los datos de viento superficial y la corriente geostrofica. Y por último se presenta una valoración de los modelos numéricos empleados en este trabajo, tras comparar los resultados de las simulaciones con la trayectoria de boyas de deriva.

En el apartado sexto se describen las **aplicaciones**. Los datos de las boyas de deriva han estado disponibles para diferentes estudios. Se describe en este apartado la implementación de una herramienta de apoyo a los sistemas de oceanografía operacional basada en un estudio estadístico y numérico. Se describen también en este apartado una serie de ejercicios prácticos llevados a cabo conjuntamente con los servicios de salvamento.

En el apartado séptimo se presentan las **conclusiones y discusión** de los resultados obtenidos así como un planteamiento de futuras acciones.

El último apartado se corresponde con la **bibliografía** empleada en el desarrollo de este trabajo.

Y como anexo se presentan las **publicaciones** presentadas en revistas y congresos relacionadas con este trabajo de tesis.

1. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Historia y evolución de las boyas de deriva

El estudio de las corrientes superficiales mediante el seguimiento de boyas a la deriva ha evolucionado mucho en las últimas décadas. Durante siglos el conocimiento que se tenía acerca de la circulación de los océanos se basaba en el seguimiento de determinados objetos que se encontraban flotando a la deriva. Esta técnica como herramienta para medir las corrientes ha permitido obtener las primeras observaciones que se tienen acerca del flujo de océano, una de las primeras referencias documentadas son las llevadas a cabo por Leonardo da Vinci (1452-1519) el cual ya utilizó esta técnica para medir la velocidad de las corrientes. En sus estudios lanzaba al agua un flotador y medía la distancia recorrida en un cierto tiempo. Pero ya por ese entonces, los navegantes disponían de conocimientos acerca del comportamiento de las corrientes en sus travesías por el Atlántico, conocían la existencia de corrientes favorables para la navegación que les acortaban el tiempo de la travesía. Benjamín Franklin a mediados del siglo 18 ya pudo elaborar un atlas de la costa este de América del Norte lanzando al mar botellas con mensaje. Fue el primero en referirse a la Corriente del Golfo como un “río en el océano” promoviendo el uso de esta corriente para acelerar la travesía de los barcos. En 1769 dibujó la primera carta de la Corriente del Golfo y en 1785 publicó un trabajo en el cual ya usaba una boya con un contrapeso para sus estudios. Durante el siglo 19 las investigaciones sobre el mar se multiplicaron y fue Mathew Fontaine Maury ayudado por botellas con mensaje a la deriva, el primero que dibujó un mapa sobre las corrientes marinas y sus movimientos.

Durante siglos fue la deriva de objetos flotantes la que permitió tener observaciones de las corrientes, pero estas observaciones proporcionaban una idea muy simple porque no indicaban de donde provenía la corriente, ni tampoco su trayectoria. Los mensajes en una botella han dado paso a las boyas de deriva que actualmente conocemos y que recorren toda la superficie del océano, siendo éstos los mejores testigos para el estudio las corrientes superficiales. La observación del océano con boyas de deriva comenzó a documentarse sistemáticamente en la Expedición del Challenger (1875-1876).

La utilización de las boyas de deriva tuvo durante años el problema de no poder conocer su localización durante su trayecto. Fue a principios de los años 70 cuando se produjo un salto cuantitativo y cualitativo en el estudio de las corrientes y sus trayectorias, cuando se desarrollaron las técnicas de posicionamiento vía satélite, que permitieron resolver el problema de localización de estos dispositivos. A finales de 1978 cuando se lanzó el satélite TIROS-N, fue cuando se adquirió la capacidad de desplegar operativamente amplias redes de boyas de deriva que transmitían la información mediante el sistema ARGOS (ver 3.1.4) permitiendo detectar plataformas superficiales en cualquier parte del mundo.

Desde 1979 oceanógrafos, meteorólogos y la Armada Americana han desplegado un gran número de boyas de deriva, lo que ha permitido estudiar distintas partes del océano creando mapas de corrientes a partir de datos de boyas de deriva (Lumpkin y Johnson, 2013). Desde 1987 La *World Meteorological Organization/Intergovernmental Oceanographic Commission* (WMO/IOC) ha coordinado el despliegue de numerosas boyas de deriva dentro de diferentes proyectos de cooperación internacional en todo el océano. Los datos se acumulan en el *Meteorological and Environmental Data Service* (MEDS) que es el centro mundial de acopio de este tipo de datos, junto con el *Drifter Data Center* (DDC) del *Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory* (AOML).

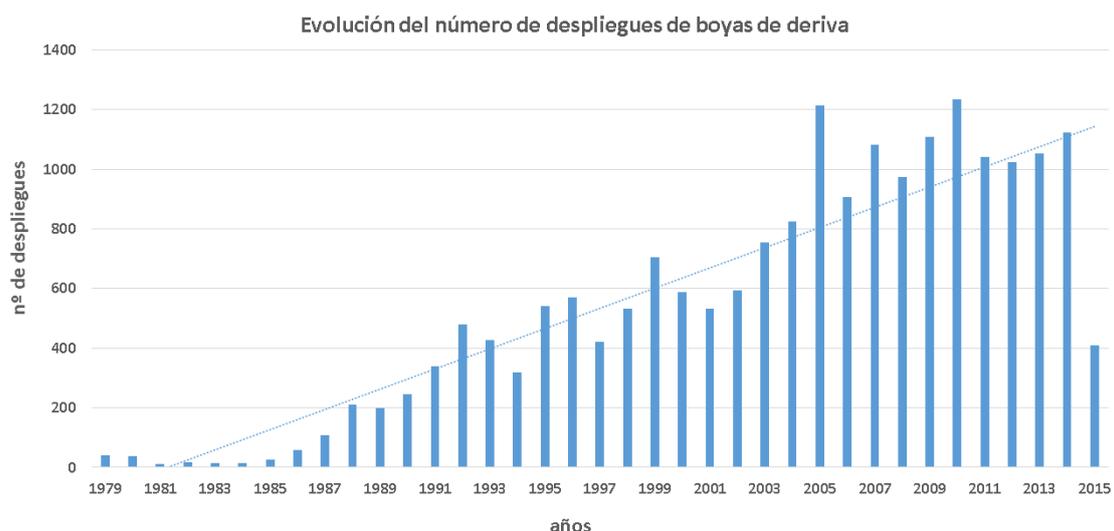


Figura 1.1. Evolución del despliegue de boyas de deriva como parte del *Global Drifter Program* (GDP).

Los datos de ARGOS para este tipo de dispositivos están disponibles desde 1979 como parte del *Global Drifter Program* (GDP) y del *Surface Velocity Program* (SVP), ambos programas forman parte del *Global Ocean Observing System* (GOOS) y de un proyecto científico denominado *Data Buoy Cooperation Panel* (DBCP), perteneciente a la Organización Meteorológica Mundial (WMO). Entre los objetivos principales del Programa Global de Drifters (GDP) está el proporcionar en tiempo real y operacional observaciones de velocidad superficial, temperatura superficial y nivel de presión del mar, para llevar a cabo estudios de investigación, de predicción numérica y para la verificación y calibración in situ de las observaciones de los satélites. Este tipo de información es cada vez más necesaria para la gestión de las zonas oceánicas y costeras, sin embargo, el océano cambia sin cesar y para proporcionar servicios adecuados debe ser observado continuamente. Además en los últimos años, los usuarios de la información oceanografía requieren que los datos sean incorporados en productos específicos y de utilidad que den conocimiento del estado del mar. La precisión de las predicciones oceánicas depende del estado de conocimiento actual que tengamos del medio, por lo que se necesitan más datos de observaciones para proporcionar productos e instrumentos de gestión más útiles y eficaces.

El proyecto del Sistema de Observación del Océano Global (GOOS) proporciona servicios oceánicos basados en la observación sostenida y repetida de los océanos, lo que ha permitido observar grandes avances en los últimos años. Como ejemplo de la gran cooperación internacional destacar el logro que tuvo lugar en septiembre del 2005, donde 87 representantes de 17 países celebraron el despliegue de la boya de deriva número 1.250 en Nueva Escocia, consiguiendo con este hecho el propósito de tener 1.250 dispositivos a flote de modo simultáneo y sostenible. Este logro prueba la sólida cooperación internacional entre las naciones e instituciones dentro de este proyecto de cooperación internacional. Para calibrar los satélites se necesita una boya sobre la superficie cada 500 kilómetros, si el océano es dividido conceptualmente en cuadrículas de 500x500 kilómetros, se necesitan 1.250 cuadrículas para cubrir todo el océano. Una boya para cada cuadrícula dan como resultado las 1.250 boyas de deriva que se han desplegado. Los países implicados en el proyecto han estado trabajando en colaboración durante 10 años para conseguir mantener las 1.250 boyas de modo sostenible.

La obtención de un conjunto global de boyas de deriva es una parte importante de los sistemas de observación del océano que se están llevando a cabo a nivel mundial por los miembros del *Joint Comision on Oceanography Marine Meteorology* (JCOMM).

El Programa Global de Drifters se administra mediante una estrecha colaboración con el *Joint Institute of Marine Observations* (JIMO) y las empresas fabricantes de boyas. El *Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory* (AOML) organiza y lleva a cabo el lanzamiento de las boyas, procesa los datos y mantiene los archivos donde se describe cada boya y el sitio web del Programa Global de Drifters (www.aoml.noaa.gov/phod/dac/gdp.html). El JIMO supervisa la industria y adquiere las boyas de los diferentes fabricantes, actualiza la tecnología y desarrolla nuevos sensores. Las empresas que construyen y suministran estas boyas de deriva son Clearwater (USA), Technocean (USA), Pacific Gyre (USA), Metocean Data System (Canadá), Marlin-Yug (Ucrania), DBi (USA). (UNESCO, 1988).

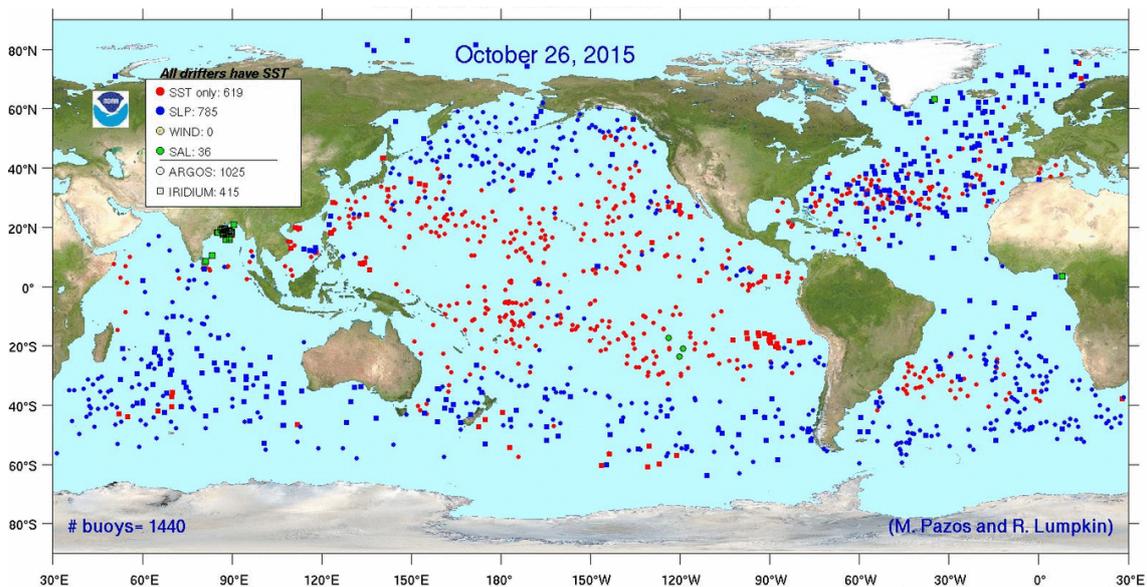


Figura 1.2. Estado del Programa Global de Drifters en octubre de 2015.

1.2 Estandarización

En 1982 como parte del *World Climate Research Programme* (WCRP), se propusieron una serie de estandarizaciones de los equipos y dispositivos de deriva utilizados, con el objetivo de mantener las mismas condiciones en todos los experimentos llevados a cabo con boyas de deriva. Hasta ese momento existían bastantes diferencias en los datos registrados, ya que existían varios modelos de boyas con características diferentes. Durante los años 80 se experimentó con todos los diseños propuestos y se llegó a una estandarización definitiva que son las utilizadas actualmente en todos los experimentos de deriva. El desarrollo de dichas estandarizaciones se llevó a cabo dentro del Programa de Velocidad Superficial (SVP) y de los experimentos denominados *Tropical Ocean Global Atmosphere* (TOGA) y *World Ocean Circulation Experiment* (WOCE), que fueron financiados por la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) y diseñados por el *Oceanographic and Meteorological Laboratory* (AOML), MIT's Draper Laboratory y el *Scripps Institution of Oceanography* (SIO).

Destacamos los trabajos realizados durante años por parte de Pearn Peter Niiler (1937-2010), considerado el padre científico del Programa Global de Drifter. Contribuyó al diseño actual de las boyas de deriva así como a otros instrumentos para las observaciones oceánicas (Niiler, 1995; Niiler et al, 1995). Las boyas de deriva usadas en este trabajo han sido fabricadas siguiendo las especificaciones establecidas por Sybrandy y Niiler (1992). Para que estos dispositivos sirvan para rastrear el movimiento de la columna de agua y no se vean afectados por el campo de vientos superficial o por el oleaje, deben tener un diseño y unas características específicas. Estos dispositivos deben constar de una boya de superficie esférica, que debe ser relativamente pequeña para minimizar la exposición al viento y los efectos que suceden en la superficie, entre sus funciones está el de darle flotabilidad a la estructura y llevar instalados los sensores, la antena de transmisión de ARGOS y la batería. Un segundo componente es el flotador subsuperficial, instalado a tres metros de la superficie, que permite reducir la tensión entre los componentes de la superficie y los sumergidos, que también sirve para reducir el efecto de las fuerzas y deslizamientos verticales. Otro componente es el amarre, que está formado por un fino alambre que minimiza el arrastre inducido por el rozamiento y es el que une la boya de superficie con la draga. La draga o contrapeso es el componente más importante, que hace la función de ancla flotante y sirve para seguir el movimiento de la capa superficial del

océano a una determinada profundidad, es cilíndrica de unos 6-7 metros y se encuentra centrada a 15 metros de la superficie.

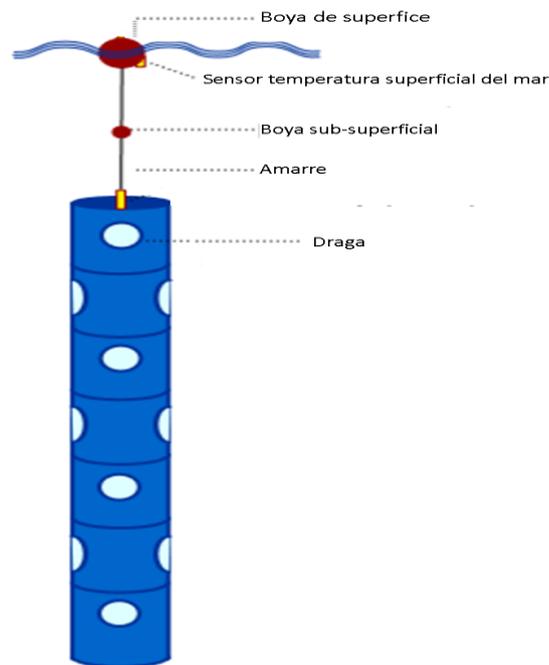


Figura 1.3. Esquema de la boya de deriva del Programa de Velocidad Superficial (SVP).

Cuando la draga es desplegada y se sumerge en el agua, ésta es empujada por la corriente lo que hace que todo el conjunto de la estructura se mueva siguiendo el flujo, el tipo de draga usada en este trabajo es la Holey-Sock, es dimensionalmente estable y resistente a los movimientos laterales en condiciones normales. La deriva de la boya se produce como consecuencia de la suma de fuerzas del arrastre debido a la boya, la draga y el cable que conecta ambos dispositivos (Niiler et al., 1995).

Cuando la draga se encuentra a una profundidad en la que la corriente es bastante distinta de la existente en la capa de mezcla, la situación es mucho más compleja. Las diferencias de dirección entre las corrientes en la capa superficial y las existentes a la profundidad a la que se encuentra la draga pueden producir errores respecto a la corriente registrada a esa profundidad. El principal problema que se plantea con este tipo de dispositivos es cuando la draga deja de funcionar antes de lo que lo hace la boya. Los estudios sugieren (Poulain et al., 2009) que en ese caso la acción del viento puede llegar a influenciar al desplazamiento de la boya hasta en el mismo orden de magnitud o superior al de la intensidad de la corriente.

Es por ello, que los datos de las boyas que pierden la draga no son considerados para los estudios de la corriente superficial (Pazan, 1996; Pazan y Niiler, 2001). Las boyas de deriva llevan instalado unos sensores en el flotador de superficie para identificar si la draga se ha desprendido o sigue operativa.

Se han realizado varios estudios de calibración para determinar la validez de las medidas obtenidas por las boyas de deriva (Niiler et al., 1987; Sybrandy y Niiler, 1992; Niiler et al., 1995). En dichos estudios de calibración se instalan dos correntímetros, uno en la superficie de la draga y otro en el fondo de la misma, en diferentes condiciones marítimas para obtener el arrastre a lo largo de la draga. El arrastre se reduce significativamente si se minimiza la tensión entre la boya superficial y la draga. El cociente entre el área de arrastre de la draga y el área de arrastre de todos los componentes de la boya se define como “R”. Este parámetro es el más importante a la hora de controlar la capacidad de estos dispositivos para seguir el flujo del agua. La velocidad de arrastre de la draga (U) a través de la columna de agua ha sido representada mediante un modelo estadístico (Niiler et al., 1995):

$$U = 3.5 (W/R) + 9.5 (DU/R) \quad (ec.1.1)$$

Donde W es la velocidad del viento en m/s a 10 metros de la superficie, DU es la diferencia de velocidad a través de la draga en cm/s medida mediante la instalación de correntímetros en la draga. Por lo tanto, para lograr una capacidad de seguimiento del agua de 1cm/s en vientos de 10 m/s, las boyas de deriva deben ser construidas con una proporción de área de arrastre de $R > 35$. Es por eso que mientras que los tamaños de los flotadores y las dragas varían de un fabricante a otro, el objetivo que han mantenido todos los fabricantes es conseguir un área de arrastre de $R > 35$. En la práctica se están obteniendo valores de $R = 37-45$. La draga Holey-Sock que es la usada en este trabajo da una proporción de área de arrastre de $R = 37$ (Niiler y Paduan, 1995; Pazan y Niiler et al, 1995). Las características de diseño de las boyas de deriva se presentan en el apartado de material y métodos (ver 3.1.3).

1.3 Comportamiento físico de la boya

El desplazamiento real de la boya en la superficie del océano va a ser la suma de las fuerzas que actúan sobre su estructura. La ecuación que describe de movimiento en el océano deriva de la segunda ley de Newton, considerando que las fuerzas que actúan sobre un elemento de fluido son: las fuerzas generadas por las variaciones de presión, la fuerza de Coriolis, la fuerza de gravedad, la fuerza de fricción y otras fuerzas que no podemos medir directamente. Por lo que la ecuación del movimiento queda definida de la siguiente manera:

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + 2\Omega V + g + F_{\text{Fricción}} \quad (ec.1.2)$$

$$(x): \frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + 2\Omega \sin \vartheta v - 2\Omega \cos \vartheta w + F_x \quad (ec.1.3)$$

$$(y): \frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - 2\Omega \sin \vartheta u + F_y$$

$$(z): \frac{dw}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + 2\Omega \cos \vartheta u - g + F_z$$

La componente del flujo geostrófico se presenta cuando existe un balance de fuerzas entre la fuerza de Coriolis y el gradiente de presión:

$$-fv = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (ec.1.4)$$

En un ambiente sin fricción donde solo actúan la gravedad y la fuerza de Coriolis tenemos un flujo inercial en un balance de fuerzas entre la aceleración y Coriolis:

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} &= 2\Omega \sin \vartheta v \\ \frac{dv}{dt} &= -2\Omega \sin \vartheta u \quad (ec.1.5) \end{aligned}$$

El principal forzante de la circulación en la superficie oceánica es la atmosfera, que transfiere movimiento a la superficie a través de los vientos. Estos inciden sobre la superficie oceánica en una delgada capa generando las corrientes marinas superficiales y

sub-superficiales. Proporcionando un mecanismo para el intercambio de energía cinética entre las parcelas de agua adyacentes. La sumatoria de fuerzas, por lo tanto, debe incluir las fuerzas de fricción, lo que produce un movimiento diferente del flujo geostrófico propio.

$$\begin{aligned}
 \text{fricción } (x) &= A_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + A_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \\
 \text{fricción } (y) &= A_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + A_z \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (\text{ec.1.6}) \\
 \text{fricción } (z) &= A_h \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + A_z \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \\
 \text{Donde: } A_h &= 10^2 - 10^5 \text{ m}^2 / \text{s} \\
 A_z &= 10^{-4} - 10^{-2} \text{ m}^2 / \text{s}
 \end{aligned}$$

Los procesos oceánicos abarcan una gran variedad de escalas espaciales y temporales que van, desde la micro turbulencia que abarca fenómenos de centímetros y segundos, a fenómenos de circulación que se extienden por las cuencas oceánicas y evolucionan en escalas climáticas (Cushman-Roisin y Beckers, 2008).

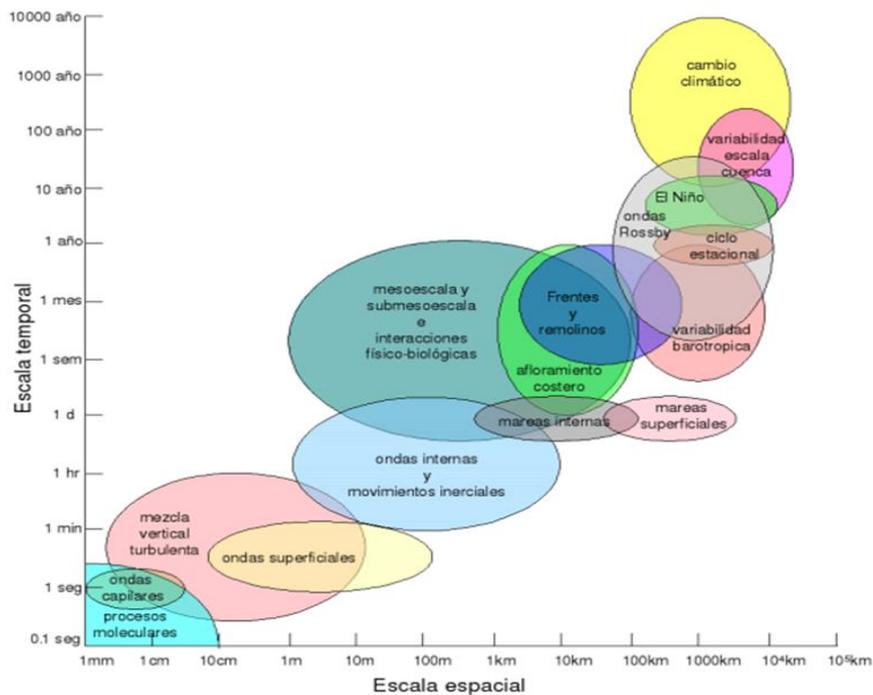


Figura 1.4. Escala espacio temporales de los procesos oceánicos (Nieto Saavedra (2009) modificada de Chelton, 2001).

Toda esta variedad de fenómenos y la interacción que se producen entre ellos, hacen que el océano presente una gran variabilidad espacio-temporal constituyendo un sistema muy complejo. Para el estudio de la corriente superficial a nivel de mesoescala (que comprende fenómenos que van de días a semanas y de cientos de kilómetros a pocos metros) hace que sea posible omitir movimientos que distan mucho de estas escalas. En nuestro caso podemos considerar que las corrientes de marea y las ondas internas son poco importantes para el transporte de masas. Una dificultad que se presenta es cuando se dan condiciones de viento muy flojos, o cuando los vectores de viento y corriente forman un ángulo cercano a los 180°, en estos casos los movimientos inerciales son bastante importantes. La fuerza de la gravedad no ejerce ninguna fuerza horizontal por lo que también puede ser despreciada en este caso (Pérez-Marrero et al., 2005).

Tras estas consideraciones el desplazamiento de la boya se puede representar principalmente como la suma del efecto de la corriente geostrófica y del viento, además de otros fenómenos que no podemos medir directamente. En un primer enfoque determinista la velocidad de cualquier objeto a la deriva (V_d) puede escribirse de la siguiente manera (Kirwan et al., 1975):

$$V_d = aW + bC + \delta \quad (\text{ec 1.7})$$

Donde W y C son respectivamente los vectores de viento y de corriente, modulados por los coeficientes de ponderación a y b que dependen de la relación de las áreas expuestas a la acción del viento y de la corriente. Además de un término de incertidumbre aleatorio δ .

Para la deriva de los objetos en la superficie del océano, los coeficientes de arrastre del viento y de la corriente (a y b) deben ser establecidos en función de cada tipo de objeto, dependiendo de la parte que esté sumergida que se encuentre expuesta a la corriente y la parte emergida que está expuesta principalmente al viento, estos coeficientes pueden cambiar en varios órdenes de magnitud.

Allen y Plourde (1999), realizaron un estudio para el cálculo del arrastre del viento en función del tipo de objeto, trabajaron con más de 50 objetos diferentes. En sus estudios de campo tuvieron en cuenta 38 tipos de balsas salvavidas diferentes, 24 tipos de embarcaciones, veleros, tablas de surf y simulaciones de personas en el agua. En la siguiente figura se representan algunos de los resultados obtenidos en sus estudios con botes salvavidas, donde instalaron diferentes tipos de contrapeso para ver como afectaba el viento a la deriva en cada caso.

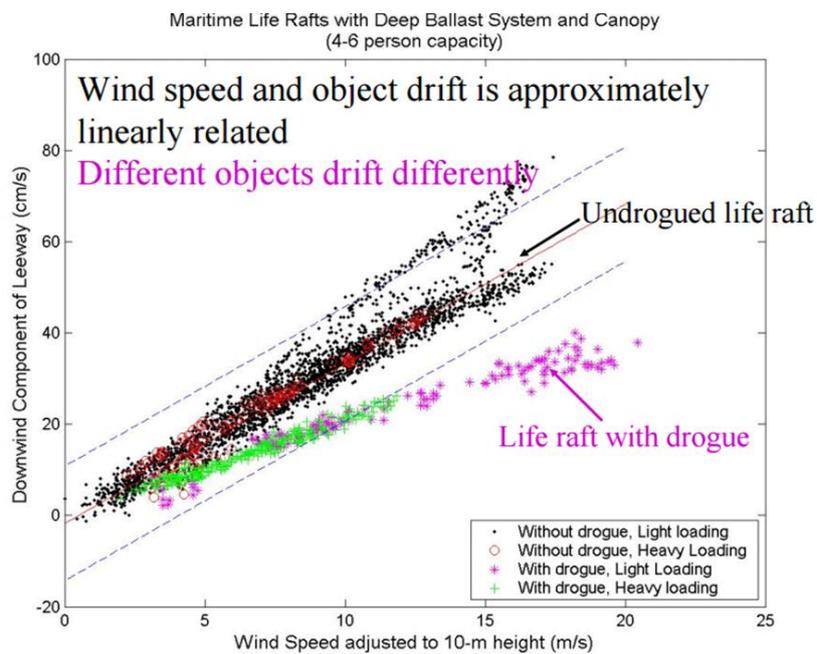


Figura 1.5. Efecto del viento sobre la deriva de botes salvavidas considerando diferentes sistemas de lastre (Allen y Plourde, 1999).

2. CARACTERÍSTICAS OCEANOGRÁFICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

2. CARACTERÍSTICAS OCEANOGRÁFICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

El Archipiélago Canario está considerado como una zona óptima para el estudio de las corrientes oceánicas a escala global. Por su origen y ubicación en la parte Centro Oriental del Atlántico Norte, esta región ha sido ampliamente estudiada desde el punto de vista oceanográfico desde hace varias décadas (Peterson et al., 1996). Pero son los estudios más recientes los que han proporcionado información más detallada de la corriente a nivel del archipiélago, debido a que han aumentado los estudios a nivel de mesoescala en esta región.

Desde el punto de vista oceanográfico las condiciones que se dan en esta región son el resultado de factores geográficos y climáticos característicos de esta zona. El archipiélago se encuentra bajo la influencia del límite oriental del Giro Anticiclónico del Atlántico Norte y por la presencia del afloramiento que tiene lugar en la costa oeste de África, cuyos efectos pueden llegar a ser apreciables en las islas en forma de filamento y remolinos (Johnson y Stevens, 2000) debido a la cercanía al continente Africano (Mittelstaedt, 1991).

Desde un punto de vista geográfico el archipiélago está constituido por un conjunto de siete islas que ocupan una longitud de unos 500 kilómetros. Las islas se orientan de forma casi perpendicular a la costa de África y conforman un obstáculo para la circulación tanto atmosférica como marina (Barton et al., 2000). La profundidad aumenta de este a oeste, desde poco más de 1000 metros entre la costa de África y las islas de Lanzarote y Fuerteventura, hasta más de 2500 metros en la zona más occidental. Estos factores hacen que la zona se encuentre influenciada por fenómenos de diferente naturaleza constituyendo un sistema de corrientes bastante complejo con intensa actividad en múltiples escalas.

El clima del archipiélago canario se encuentra bajo la influencia principal de dos dominios climáticos que son las altas presiones subtropicales y la circulación del oeste de las latitudes medias. Desde la primavera a bien entrado el otoño Canarias queda bajo la influencia del sistema de altas presiones situado en las Azores, haciendo que los vientos alisios del noreste (que están presentes todo el año) presenten su máxima intensidad durante el verano.

Durante el invierno el centro de altas presiones sufre un descenso en latitud favoreciendo la llegada de borrascas. Cuando el núcleo de las borrascas se sitúa sobre África trae consigo los eventos de calima característicos de esta región. Estos eventos suceden sobre todo en invierno pero eventualmente pueden darse en cualquier época del año y como consecuencia se produce la llegada de gran cantidad de aerosoles al archipiélago (Pérez-Marrero et al., 2002; Torrez-Padrón et al., 2002).

En las latitudes ecuatoriales la zona de convergencia entre los vientos alisios en el Hemisferio Norte y el Hemisferio Sur se denomina Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). Las variaciones estacionales de los vientos alisios en Canarias se considera que son debidos al desplazamiento del anticiclón de las Azores y de la ZCIT. Las variaciones de larga duración de tipo interanual están más relacionadas con las características meteorológicas propias de cada año en concreto. Encontrándose también variaciones de corta duración que se relacionan con “pulsos de viento”, sucesión de periodos de fuertes vientos con periodos de viento débil y dirección variable. (González-Muñoz et al., 1996).

2.1 Corriente de Canarias

Los estudios de la Corriente de Canarias que se han venido realizando durante años han demostrado que esta corriente presenta una gran variabilidad tanto en estructura como en intensidad. Y han sido muchas las discrepancias por parte de los diferentes autores a la hora de definir las propiedades del flujo que incide sobre el Archipiélago Canario.

El sistema de circulación en la región este del Atlántico Norte está definido por la Corriente de las Azores, la Corriente de Portugal, la Corriente de Canarias y la Corriente Norecuatorial. Además debido a la cercanía del continente africano esta zona se encuentra bajo la influencia del afloramiento del noroeste de África. Varios estudios (Stramma, 1984; Stramma y Siedler, 1988; Klein y Siedler, 1989) han confirmado que la corriente del Golfo enlaza con la corriente de las Azores (Käse y Siedler, 1982; Juliano y Alves, 2007) y ésta a su vez con la Corriente de Canarias confluyendo con la Corriente Norecuatorial.

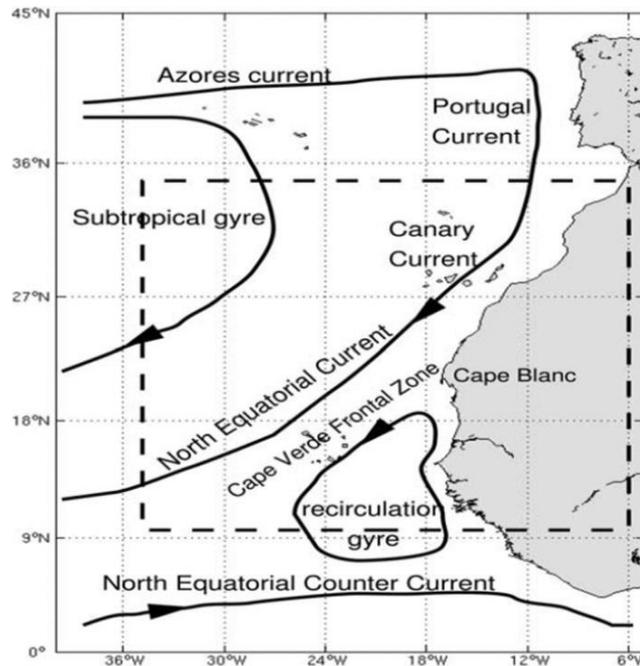


Figura 2.1. Circulación a gran escala adaptada por Mittelstaedt (1991) y Stramma et al. (2005).

La corriente de Azores que fluye hacia el sur en la Cuenca de Canarias se divide en tres ramales sobre la latitud de Madeira (Stramma, 1984; Klein y Siedler, 1989), dos hacia el sur y el tercero hacia el oeste. La prolongación hacia el sur del ramal oriental constituye la Corriente de Canarias (Zhou et al., 2000). Otros autores en sus estudios (Batten et al., 2000, Hernández-Guerra et al., 2005) afirman que la corriente de Portugal, que se encuentra frente a la costa oeste de la península ibérica, es parte de la corriente de Canarias. Por el contrario Stramma (1984), consideró que la corriente de Portugal es la rama que alimenta el agua procedente del Océano Atlántico que entra en el Mar Mediterráneo, sin conectar con la Corriente de Canarias.

La Corriente de Canarias fluye a lo largo de la costa de África de norte a sur entre 30 ° N y 10 ° N y la costa hasta 20 ° W (Fedoseev, 1970) durante todo el año hacia el ecuador (Wooster et al., 1976). Sus aguas superficiales son relativamente frías, porque a medida que viajan hacia el sur arrastran agua aflorada de la costa (Mittelstaedt, 1991).

Autor	Año de publicación	Velocidad de la Corriente
Fedoseev	1970	70 cm/s
Molina	1976	15 cm/s
Stramma et al.	1984	1 cm/s
Molina y Laatzén	1986	35 cm/s
Müller et al.	1990	25 cm/s
Zhou et al.	2000	10-15 cm/s
Navarro-Pérez y Barton	2001	5 cm/s

Tabla 2.1. Valores de la intensidad de la Corriente obtenidos por diferentes autores.

Una de las posibles discrepancias por parte de los autores a la hora de definir la corriente puede ser debida a la diferente resolución entre los estudios que se han llevado a cabo. En la región de Canarias se dan fenómenos en diferentes escalas espacio-temporales y eso es un factor a tener en cuenta a la hora de definir las características de esta corriente. Los estudios de Fedoseev (1970) permiten entender la variabilidad espacial de la corriente a un nivel de mesoescala, que no resolvieron Stramma y Siedler (1988), dado que la fuerte actividad de mesoescala generada en esta región puede llegar a enmascarar la señal estacional a gran escala.

Fedoseev (1970) describió los patrones estacionales de la Corriente de Canarias. Determinó que durante el invierno la Corriente de Canarias está en su máxima fuerza y que en primavera la corriente se debilita. Estimó que en verano se reducía la entrada de agua desde el norte lo que debilita la Corriente de Canarias que se extiende hacia el exterior desde la costa. Consideró en sus estudios que durante el otoño la corriente de Canarias está en su punto más débil.

Los trabajos de Stramma (1984) y Stramma y Siedler (1988) dan una descripción contradictoria a la anterior, determinaron que la Corriente de Canarias es débil y variable en el invierno y la primavera. El bucle anticiclónico en la cuenca de Canarias se va a ver modificado, en verano va a sufrir un estrechamiento meridional y un desplazamiento hacia el sur (Klein y Siedler, 1989), esto se debe a que la Corriente de las Azores durante el verano se desplaza hacia el sur y la Corriente Norecuatorial hacia el norte, provocando una compresión norte-sur que hace que la Corriente de Canarias se intensifique más en las islas más orientales, estando la Corriente de Canarias más cerca a la costa africana en verano y alejándose en invierno. Durante la primavera y el verano la Corriente de Canarias es más intensa y constante, estando su flujo principalmente concentrado entre la costa de África y Tenerife. En otoño se intensifica la corriente al oeste de La Palma y en invierno la corriente es más débil y variable.

De los anteriores autores y de estudios más recientes (Navarro-Pérez y Barton, 2001) se determina que el flujo de la corriente superficial es más fuerte en primavera y verano en las islas orientales y la costa de África, mientras que es más fuerte en invierno en las islas exteriores y mar abierto, coincidiendo con el avance y retroceso del Giro Anticiclónico del Atlántico Norte. La variabilidad interanual indica que el flujo de la corriente es principalmente hacia el sur, aunque a veces presenta una tendencia hacia el norte en años excepcionales.

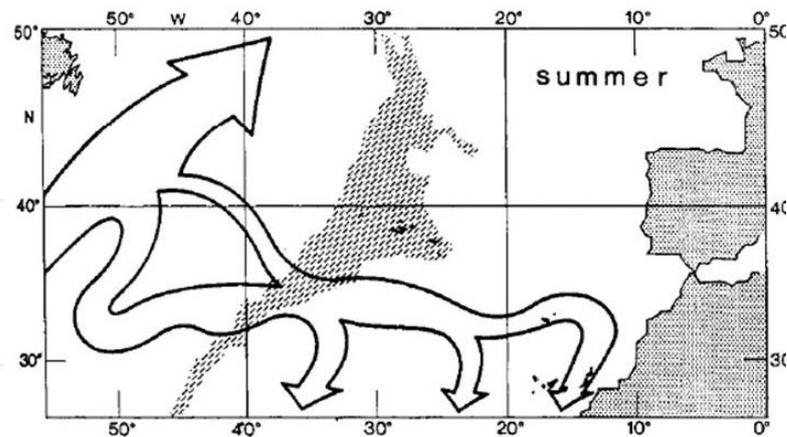


Figura 2.2. Circulación superficial en el Atlántico Norte por Klein y Siedler (1989) en verano.

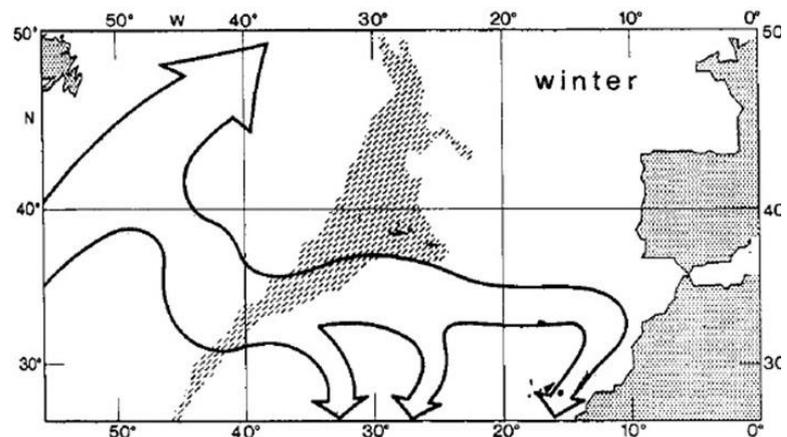


Figura 2.3. Circulación superficial en el Atlántico Norte por Klein y Siedler (1989) en invierno.

Debido a la cercanía al continente africano, en la zona de estudio podemos identificar el denominado jet costero asociado a las regiones de afloramiento. Es un frente que se genera entre las aguas costeras afloradas y las aguas oceánicas circundantes, que da lugar a una corriente muy intensa que va hacia el sur y que persiste durante todo el año sobre la plataforma y el talud de África (Hernández-Guerra et. al; 2003). Los cabos de la costa africana (Ghir, Jubi y Bojador) rompen la continuidad de este jet, generando agua aflorada hacia mar abierto, que son denominados filamentos asociados al afloramiento. Estos filamentos alcanzan las islas más orientales como Fuerteventura y Lanzarote y en algunos casos llegan a Gran Canaria (Hernández-Guerra et al., 1993).

Parece razonable pensar que parte de la variabilidad a escala de la cuenca es debida a la variabilidad del campo de vientos. Mittelstaedt (1991) mediante un modelo numérico de circulación general corroboró las observaciones realizadas por Stramma y Siedler (1988), donde se considera la tensión del viento como el principal agente causante de la variación del flujo en la región. Determinando que la estructura e intensidad de la Corriente de Canarias está fuertemente influenciada por la variación estacional de los vientos alisios.

La principal incertidumbre generada sobre los estudios de la Corriente de Canarias alrededor de las islas, se debe a la ausencia de medidas continuas en todo el área del archipiélago al mismo tiempo. En este sentido el despliegue de boyas de deriva de un modo sistemático y durante un largo periodo de tiempo ha contribuido a tener un mayor número de observaciones de modo simultáneo, lo que ha permitido determinar las principales tendencias de la corriente superficial en torno al archipiélago.

2.2 Estructura vertical de las masas de agua

Las corrientes oceánicas son generadas por la combinación de varios procesos. La acción del viento en la capa superficial del océano es el principal causante de las corrientes superficiales. Las corrientes más profundas son debidas a las variaciones de densidad del agua de mar (Pickard, 1968), es la denominada circulación termohalina y se produce debido a cambios de temperatura y salinidad entre las regiones de bajas y altas latitudes en el interior del océano. Las características físico-químicas del agua de mar nos permiten distinguir entre diferentes masas de agua, entendiéndose este concepto como un volumen de agua que tiene un origen común y con características físico-químicas similares. Una vez formadas, se hunden a una profundidad determinada en función de su densidad y a partir de ese momento se desplazan fundamentalmente debido al gradiente de densidad. En contraste con la intensidad de la circulación superficial, la circulación termohalina es mucho más débil (Olbers et al., 1985). La circulación convectiva de las masas de agua esta relacionada con e flujo de calor a través de todos los océanos, contribuyendo a la distribución latitudinal del calor, siendo este un factor importante para el estudio del clima y el intercambio de calor y gases con la atmósfera.

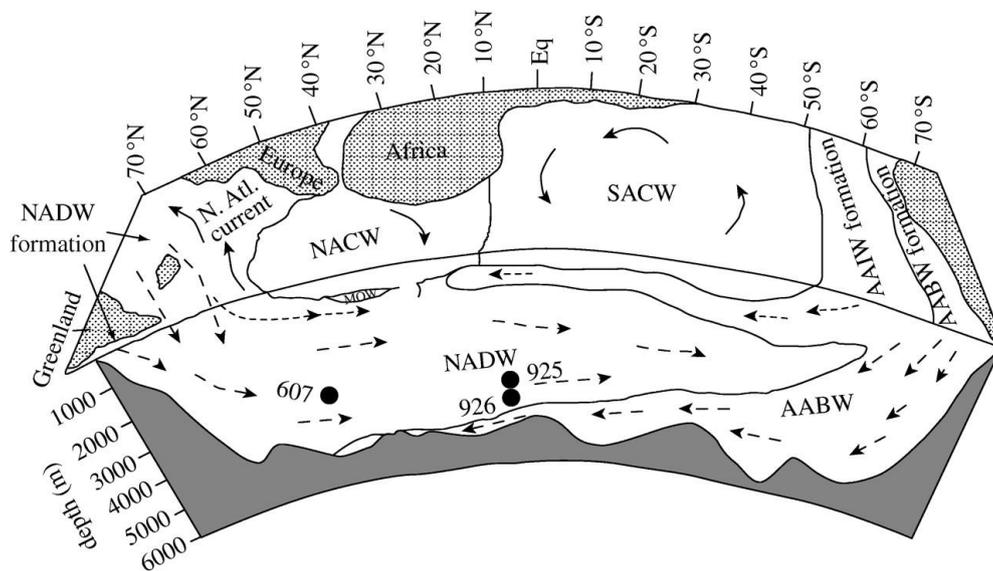


Figura 2.4. Masas de agua en el Océano Atlántico Oriental (Pickard y Emery, 1982).

La capa de agua superficial en el entorno del Archipiélago Canario presenta un espesor variable a lo largo de todo el año, controlado por el intercambio de calor con la atmósfera, debido a los procesos que se suceden en la capa superficial del océano (Levitus, 1982; Monterey y Levitus, 1997). A finales del invierno (febrero, marzo) alcanza el máximo espesor entre 160 y 180 metros, presentando homogeneidad en sus propiedades debido al intenso proceso de mezcla vertical debido al intercambio de calor con la atmósfera. A finales del verano, la capa de agua superficial tiene un espesor de entre 40 y 60 metros, como consecuencia del calentamiento estacional, presentando un gradiente importante de sus propiedades (Llinás y Rueda, 2008).

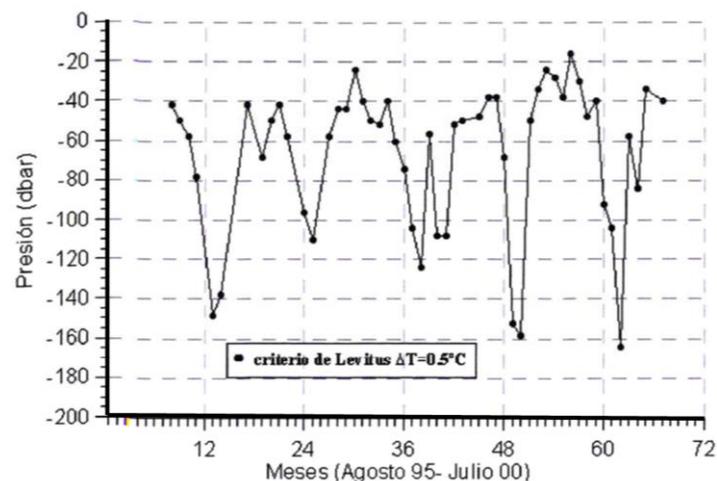


Figura 2.5. Profundidad de la capa de mezcla para el periodo 1995-2000 obtenida por el criterio de Levitus (1982) $\Delta T=0.5^{\circ}\text{C}$ (Cianca, 2003).

Con respecto a la estructura vertical de masas de agua, Knoll et al. (2002) identifican cuatro masas de agua presentes en la zona, el Agua Superficial (SW, Superficial Water) de los 0-150 metros, el Agua Central del Atlántico Norte (NACW, North Atlantic Central Water) en los 100-700 metros, el Agua Antártica Intermedia (AAIW, Antarctic Intermediate Water) entre los 600-1100 metros y el Agua Mediterránea (MW, Mediterranean Water) de los 1000 metros al fondo. Por su parte, Hernández-Guerra et al. (2001) han observado que la Corriente de Canarias está constituida principalmente por NACW, MW, AAIW, y por el Agua Profunda del Atlántico Norte (NADW, North Atlantic Deep Water).

El Agua Central del Atlántico Norte emerge cerca del norte de las islas y su zona de formación ocasionalmente puede llegar a extenderse hasta el propio archipiélago. Esta constituye el núcleo esencial de agua que gira en el Atlántico Norte Central y se considera que está integrada por volúmenes parciales denominados “modos” que se identifican con su área de formación, la más superficial en esta región es el Agua Modal Madeira (AMM), (Llinás et al., 2002; Cianca et al., 2009).

La caracterización de las propiedades termohalinas de las masas de agua, así como la distribución y los flujos de transporte en la región de Canarias ha sido objeto de varios estudios (Hernández-Guerra et al., 2001; 2005), sobre todo en el canal entre la costa de África y las islas más orientales (Hernández-Guerra et al., 2003; Machín et al., 2006; Fraile-Nuez et al., 2010). Los estudios muestran la presencia de un patrón estacional para las masas de agua identificadas en esta región. Salvo el Agua Antártica Intermedia, que tiene como componente principal un desplazamiento hacia el norte, el resto de las masas de agua tienen una componente dominante hacia el sur.

En nuestro caso, debido a la característica de diseño de las boyas de deriva, el estudio de la Corriente de Canarias se va a centrar únicamente en la capa de agua superficial, los primeros metros que se corresponderán principalmente con la capa de mezcla.

2.3 Afloramiento del Noroeste de África

La costa noroccidental de África está sometida a la influencia de los vientos alisios de dirección norte-noreste que van paralelos a la costa. El balance que se produce entre la fuerza de fricción del viento y la fuerza de Coriolis da como resultado un transporte de masa de agua superficial desde la costa hacia el océano (Ekman, 1905). Este transporte se ve compensado por aguas frías y ricas en nutrientes que suben a la superficie. El agua aflorada se extiende hacia afuera sobre la plataforma costera y se hunde en la zona de convergencia en la parte más externa de la plataforma.

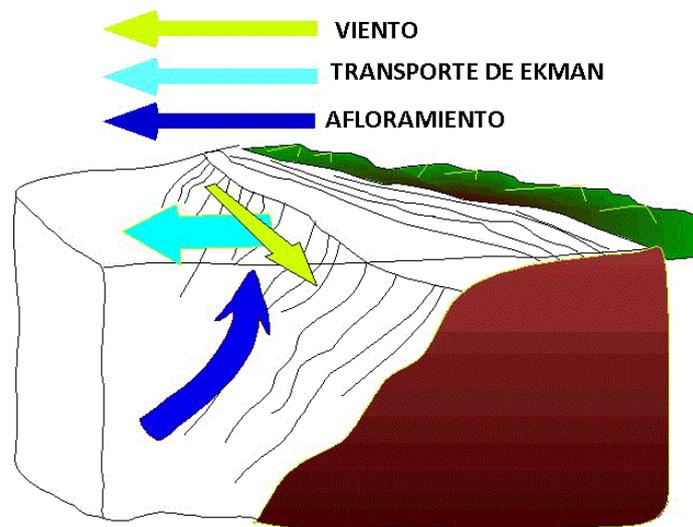


Figura 2.6. Esquema del proceso de afloramiento. Relación del viento, el transporte de Ekman y el afloramiento de las aguas subsuperficiales. Imagen del PFEL/NOAA.

Una característica del afloramiento es la presencia de dos sistemas de corrientes en direcciones opuestas. Por una parte, la corriente superficial que fluye a lo largo de la plataforma dirigida hacia el ecuador, se fortalece sobre la plataforma por un flujo costero en la misma dirección asociado con el fenómeno de afloramiento (jet costero). Y por otra, se desarrolla una corriente hacia el norte que fluye sobre el talud continental y fuera de la plataforma, ocupando la capa subsuperficial o toda la columna de agua en función de la variabilidad del campo de viento (González-Muñoz, 1995).

Otra característica de los afloramientos, es que la temperatura superficial de las aguas afloradas es más fría que la de las aguas circundantes y con mayor concentración fitoplanctónica (debido a un aumento en el contenido en sales y nutrientes), estos parámetros son los más utilizados para la identificación de las zonas de afloramiento costero. Estos gradientes de temperatura y clorofila son detectables desde sensores situados en satélites (Van Camp et al., 1991; Pérez-Marrero, 1998).

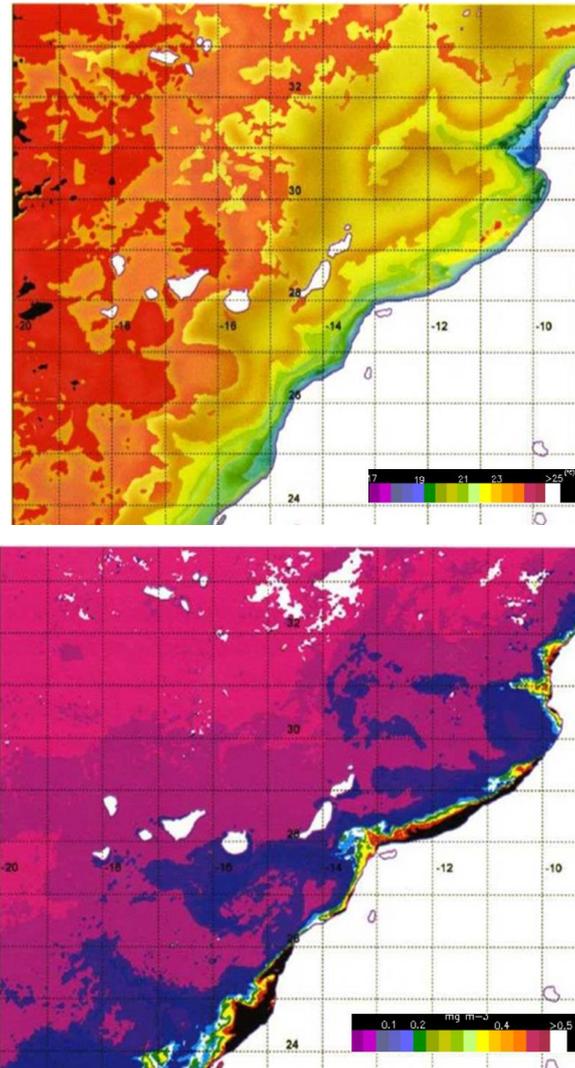


Figura 2.7. Distribución de temperatura superficial del mar (superior) y concentración de clorofila a (inferior) observada desde satélite (MODIS/NASA), correspondiente al mes de agosto de 2005 (Pérez-Marrero et al., 2005).

La Corriente de Canarias se caracteriza por una intensa actividad de mesoescala encontrándose en una zona de transición entre las aguas frías y ricas en nutrientes provenientes del afloramiento y las cálidas aguas oligotróficas del océano abierto (Barton et al., 1998). Numerosos estudios describen las principales características que se suceden en esta región de afloramiento, donde se producen remolinos y filamentos que dan lugar a un importante transporte de materia orgánica desde la costa hacia el océano abierto (Barton y Aristegui, 2004; Álvarez-Salgado et al., 2007). El afloramiento contribuye al enriquecimiento de nutrientes, lo que conlleva un aumento de los niveles de productividad y mejores condiciones de alimento para las especies de los niveles tróficos superiores, siendo las regiones de afloramiento zonas con una gran producción pesquera (Nieto Saavedra, 2009).

La variación estacional del alisio sobre la costa del noroeste de África tiene como resultado la variabilidad del afloramiento (González-Muñoz, A., 1995). La distribución del afloramiento permite establecer tres zonas características, una zona central en la que el afloramiento es prácticamente constante (en torno a 20°N y 24°N) y dos zonas con afloramiento estacional en verano al norte y en invierno al sur de la zona central de afloramiento. A parte de las variaciones a gran escala que se establecen dentro de un periodo anual, existen variaciones interanuales con periodos de orden de años en los que se presentan épocas de intensa actividad de afloramiento junto otros periodos más irregulares.

Hay autores que describen que la variabilidad del afloramiento está relacionada con La Oscilación del Atlántico Norte (NAO). Aristegui et al. (2004) señalan que existe una correlación negativa entre la NAO y las anomalías de la temperatura superficial del mar. Lo que sugiere que valores positivos de la NAO inducen a una intensificación de los vientos favorables a los afloramientos, que producen anomalías negativas de la temperatura superficial del mar.

2.4 Fenómenos de mesoescala

En determinadas regiones del océano la energía asociada con los procesos de mesoescala puede ser superiores a la energía del flujo medio, de ahí la importancia de estudiar la actividad de mesoescala para entender la dinámica global en la zona de estudio (Molina y Laatzén, 1986). Ya desde los años 90 se empezó a investigar sobre la importancia de los procesos de mesoescala en la cuenca de Canarias (Müller y Siedler, 1992). La dinámica de mesoescala, como ya se comentó en el correspondiente apartado de introducción, abarca procesos que van de pocos días a meses y una escala espacial de escasos metros a centenares de kilómetros. En este apartado nos vamos a centrar solo en los fenómenos de mesoescala de tipo remolinos (eddys), debido a que en la cuenca de Canarias existe un intenso campo de remolinos que, aunque no tan energéticos como los observados en la cuenca occidental, dominan ampliamente el flujo medio (Pond y Pickard, 1983).

La generación de remolinos está relacionada con los cambios de vorticidad asociados con las irregularidades de la línea de costa y la topografía del fondo marino, en combinación con los vientos. Las posibles fuentes de los remolinos que se forman en la región en torno a las Islas Canarias puede encontrarse por las inestabilidades generadas por la corriente de las Azores (Käse y Siedler, 1982), la corriente de Canarias (Käse et al., 1985) y por el afloramiento de la costa de África (Mittelstaedt, 1991). El obstáculo que generan las islas al paso de la Corriente de Canarias por el archipiélago, también hace que se formen numerosos remolinos mesoescalares al suroeste de las islas (Sangrá, 2005, 2007). La formación de estas estructuras es muy importante porque tienen mucha energía cinética y porque pueden transportar las propiedades del agua grandes distancias. Estas estructuras mesoescalares han sido bastante estudiadas durante años desde el punto de vista biológico (Aristegui et al., 1997; Basterretxea et al., 2002; Lasternas et al., 2013) debido a su importancia y sus efectos en la región en torno al archipiélago canario.

Los remolinos oceánicos pueden ser clasificados en tres tipos (McGillicuddy et al., 1999) según las características de la temperatura de la superficie del mar, la anomalía del nivel del mar y la rotación. Están los remolinos ciclónicos (**C**) que son los remolinos de núcleo frío, que hace que el fluido rote en sentido contrario a de las agujas del reloj, esta rotación hace que la termoclina se eleve hacia la superficie. El segundo tipo de remolinos son los anticiclónicos (**A**) que son los remolinos de núcleo caliente, que hace que el fluido rote en el sentido de las agujas del reloj, este tipo de remolinos hace que la termoclina sea empujada hacia el fondo. El tercer tipo de remolino es el denominado modo de agua (**M**) o también denominado remolino intratermoclina, porque se sitúan dentro de la termoclina formando una lente y estratificando la columna de agua. La rotación de este tipo de remolinos es anticiclónico, sin embargo el desplazamiento de la termoclina estacional es igual que en los remolinos ciclónicos lo que hace que se eleve hacia la superficie.

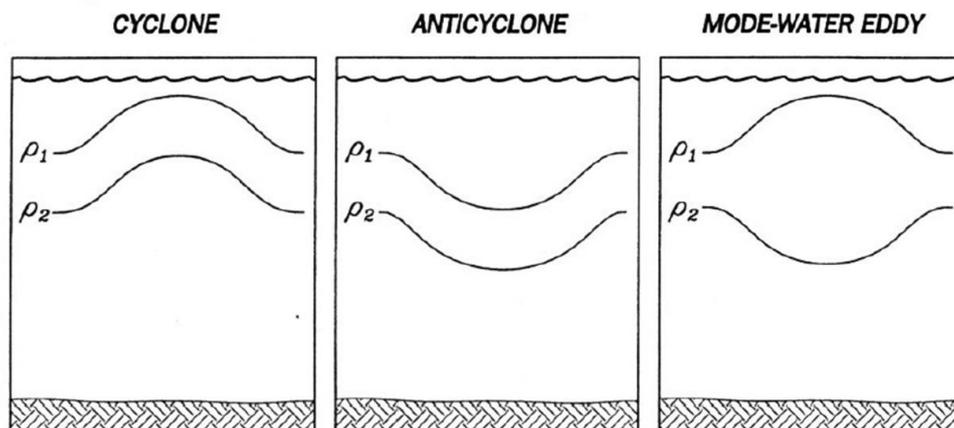


Figura 2.8. Desplazamientos de las isopícnas asociados a los tres tipos de remolinos. Se representan dos superficies de densidad, uno en la termoclina estacional ρ_1 y otro en la termoclina permanente ρ_2 (McGillicuddy et al., 1999).

La formación de remolinos ciclónicos producen un afloramiento que eleva agua desde la capa afótica mejorando el suministro de nutrientes y la productividad primaria (Edén y Dietze, 2009). Por el contrario los remolinos anticiclónicos al producir un hundimiento del agua no permite la entrada de nutrientes de la capa afótica hacia la superficie. Algunos estudios sugieren que los remolinos de agua modo también aportan un aumento de nutrientes que pueden generar un aumento en la producción primaria (McGillicuddy et al., 2007).

Los estudios llevados a cabo en los remolinos generados en torno a las islas, determinan que son estructuras de larga duración, lo que va a condicionar el sistema de circulación a nivel local. Sangrá et al. (2009) describieron como los remolinos generados en esta zona construyen un corredor zonal de remolinos al que denominaron "*Canary Eddy Corridor*", generados por la perturbación de la Corriente de Canarias y los vientos alisios, considerándolo como un fenómeno zonal de larga duración (de más 3 meses de duración). El rango latitudinal del corredor es de 22°N-29°N y se extiende desde las Islas Canarias hasta al menos 32°W. Consideraron en sus estudios que al menos el 10% de los remolinos de mesoescala que se generan en esta región son de larga duración, con un predominio de los anticiclones sobre ciclones.

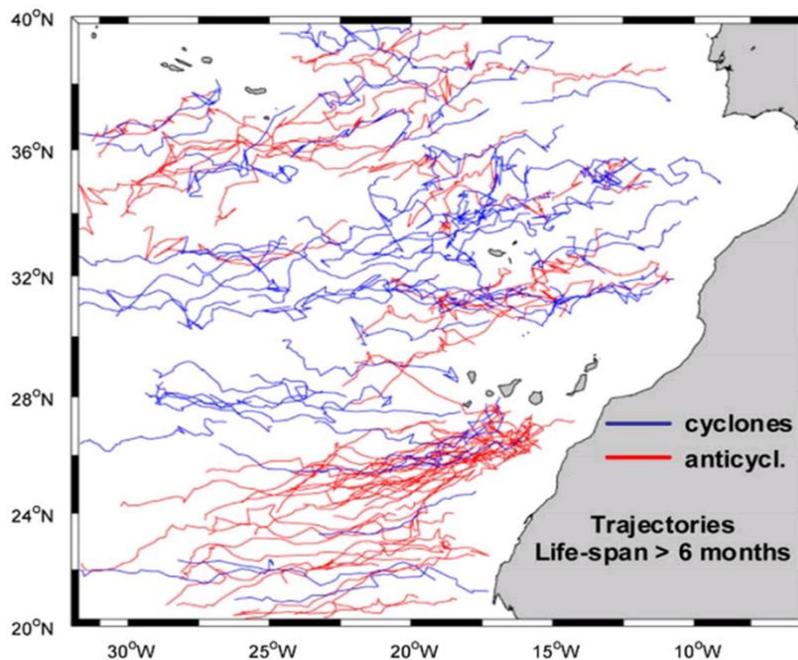


Figura 2.9. Trayectorias de remolinos de larga duración (más de seis meses), obtenidos a partir de 14 años de datos del altímetro (1992-2006). Se identifican en azul las estructuras ciclónicas y en rojo las anticiclónicas. Sangrá et al. (2009).

Los remolinos mesoescalares pueden ser identificados mediante imágenes de temperatura superficial del mar y mediante datos de altimetría (Tejera et al., 2002; García-Weil et al., 2003, 2006). Pero también destacamos la gran utilidad que presentan las boyas de deriva para identificar este tipo de estructuras y su evolución.

García Weil et al. (2005, 2007) identificaron varios remolinos ciclónicos y anticiclónicos mediante imágenes de satélite y el seguimiento de boyas de deriva, determinando su frecuencia de aparición así como sus escalas espaciales y temporales. En base a sus estudios determinaron que al suroeste de las islas los remolinos ciclónicos se generan más frecuentemente que los remolinos anticiclónicos, siendo estos últimos de mayor tamaño y mayor tiempo de duración. Estas estructuras están presentes durante todo el año, pero se observó que se generan más durante el segundo semestre del año (entre junio y octubre), pudiendo estar relacionado con el carácter estacional del viento y la corriente en el área.

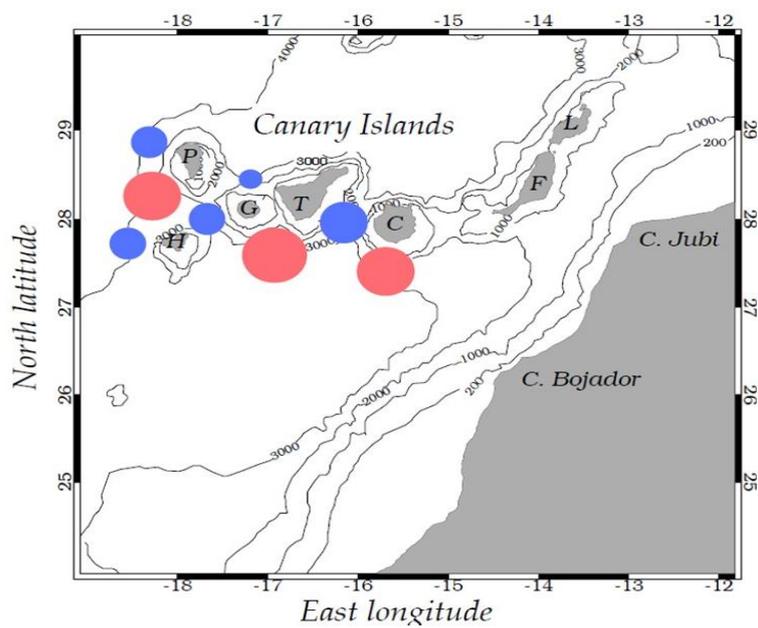


Figura 2.10. Mapa donde se identifica la zona de formación de remolinos ciclónicos (azul) y anticiclónicos (rojo). García Weil et al. (2006).

2.5 Estación Europa de Serie Temporales Oceánicas de Canarias-ESTOC

Mediante la observación de largas series de datos oceanográficos es posible resolver cuestiones de importancia global y contribuir al desarrollo de los modelos numéricos de circulación oceánica global. La Estación Europea de Series Temporales Oceánicas de Canarias (ESTOC) fue la primera estación oceánica permanente en Europa con sus características (Llinás et al., 1994; Neuer y Rueda, 1997; Siedler y Llinás, 1999). Está localizada a 60 millas náuticas al norte de las islas de Gran Canaria y Tenerife, en la posición $29^{\circ} 10'$ norte, $15^{\circ} 30'$ oeste, con una profundidad de 3.600 metros. Está ubicada en un lugar idóneo y estratégico para el estudio de las características oceanográficas en la región, además del fácil acceso que supone debido a la cercanía a las islas. En la actualidad la estación comprende cerca de 20 años de medidas cuasi-mensuales de los principales parámetros hidrográficos y biogeoquímicos.

El proyecto ESTOC surge como contribución a los proyectos internacionales *World Ocean Circulation Experiment* (WOCE) y *Joint Global Ocean Flux Study* (JGOFS) que pretenden resolver el problema que implica la falta de información para el estudio del comportamiento de los océanos a escala global. El disponer de series temporales de los principales parámetros oceanográficos va a permitir establecer los ciclos estacionales e interanuales de los parámetros medidos. Además va a permitir modelar y predecir la circulación general de los océanos, así como su evolución y su variabilidad climática.

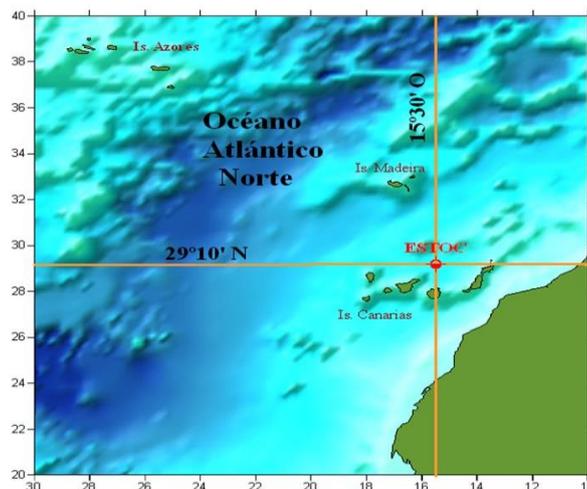


Figura 2.11. Mapa de la localización geográfica de la estación ESTOC (www.estoc.es)

La estación por su localización estratégica en la parte oriental del giro del Atlántico Norte, pretende contribuir al estudio de la variabilidad del sistema de circulación del Atlántico Norte. Se encuentra en una zona de transición entre la región del afloramiento de la costa de África y las aguas oceánicas oligotróficas del giro subtropical del Atlántico Norte (Neuer et al., 2002; 2007). Los estudios realizados en la estación ESTOC a lo largo de casi 20 años, han mostrado tendencias estacionales e interanuales de los parámetros físicos y químicos como consecuencia de los cambios estacionales en la posición del Giro Subtropical de Atlántico Norte. Los estudios muestran también una variabilidad interanual asociada a fenómenos como La Oscilación del Atlántico Norte (NAO) y El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) (Cianca et al., 2007; 2012). Dada su cercanía al continente africano, en la estación también se han llevado a cabo estudios sobre los eventos de polvo sahariano que se suceden en esta región y como responde el medio a este tipo de eventos (Neuer et al., 2004; Gelado et al, 2005).

La estación ESTOC pretende contribuir al estudio de la variabilidad del sistema de circulación del Atlántico Norte en combinación con la estación BATS (Bermuda Atlantic Time-Series Study) localizada en la parte occidental del mismo giro del Atlántico Norte (Cianca et al., 2007, 2012).

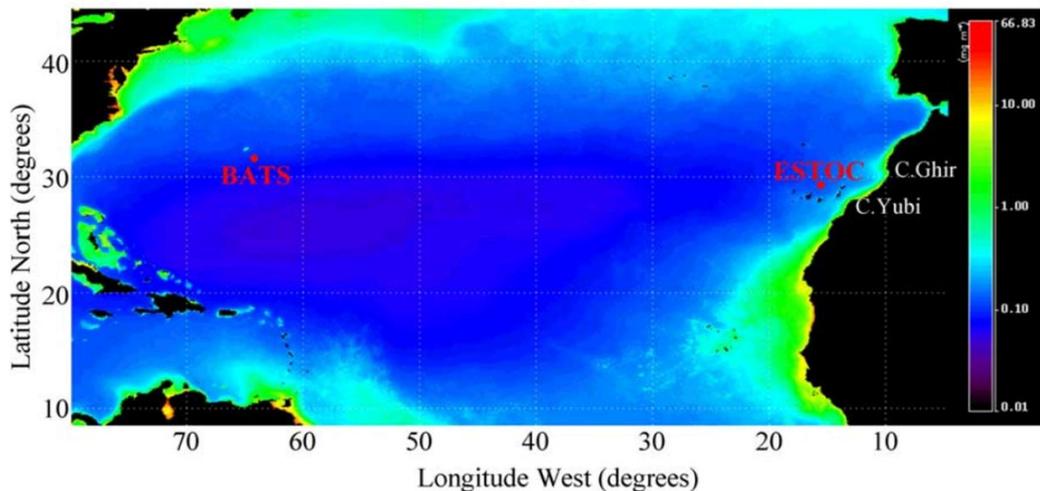


Figura 2.12. Imagen de SeaWiFS de la concentración de clorofila (a) acumulada para el periodo 1997-2006. Se identifican al estación ESTOC y BATS (Cianca et al., 2007).

Los datos de largas series temporales obtenidos en la estación ESTOC, han contribuido al desarrollo de proyectos relacionados con la modelización numérica, permitiendo alimentar y validar modelos tanto meteorológicos como oceánicos (Proyecto MOMAC; Modelo Físico-Químico para la región de la Macaronesia).

Del mismo modo la estación ESTOC forma parte de una red europea integrada de observatorios. Y durante años ha sido considerada como estación de referencia para el desarrollo de proyectos tecnológicos como el proyecto EuroSITES (*European Ocean Observatory Network*). Entre cuyos objetivos está mejorar la capacidad de observación del océano y del fondo marino, constituyendo una red de observatorios oceánicos, favoreciendo el desarrollo de sensores y nuevas tecnologías. La estación ha estado monitorizada durante un largo periodo de tiempo con boyas mete-oceanográficas siendo un lugar idóneo para la calibración de equipos y la puesta en marcha prototipos de aplicación marina. La estación también ha proporcionado un servicio integrado de vigilancia de los océanos en apoyo a la gestión ambiental, la seguridad marítima y el uso sostenible de los recursos marinos, como componente del *Global Monitoring for Environment and Security* (GMES), mediante el desarrollo del proyecto Mersea (*Marine environment and Security for the European Area*).

Mediante un enlace web se puede acceder a los datos de la boya en tiempo real (<http://www.estoc.es>).

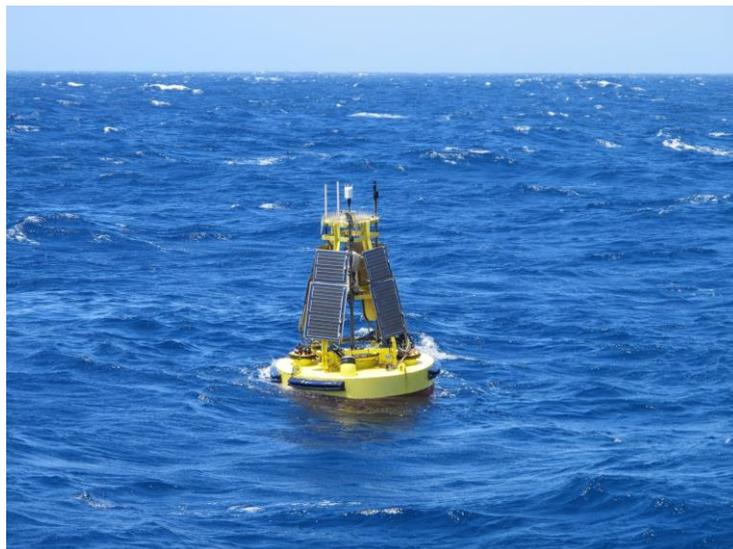


Figura 2.13. Boya mete-oceanográfica fondeada en la estación ESTOC.

En febrero de 1998 se inició un proyecto de cooperación internacional con la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) dentro del programa *Surface Velocity Program* (SVP) para la observación de la corriente superficial de los océanos, que consistía en el despliegue periódico de boyas de deriva en la estación ESTOC. Hasta ese momento se disponían de pocas observaciones de la corriente superficial en la región entorno al Archipiélago Canario, debido a la escasez de boyas desplegadas en esa zona. Este proyecto de colaboración ha contribuido a aumentar considerablemente el número de observaciones en esta zona. En los últimos 15 años se han desplegado como parte del programa general de lanzamientos del *Global Drifter Program* (GDP), más de 130 boyas de deriva en la estación ESTOC. Entre los objetivos del *World Ocean Circulation Experiment* (WOCE) está el despliegue sistemático de boyas de deriva en todos los océanos del mundo durante largos períodos de tiempo. Esto ha permitido tener una visión global de la velocidad superficial para todo el océano a partir de los datos de las boyas de deriva. En la siguiente figura se muestra la velocidad superficial para todo el océano obtenida de los datos de los boyas (Lumpkin y Johnson, 2013).

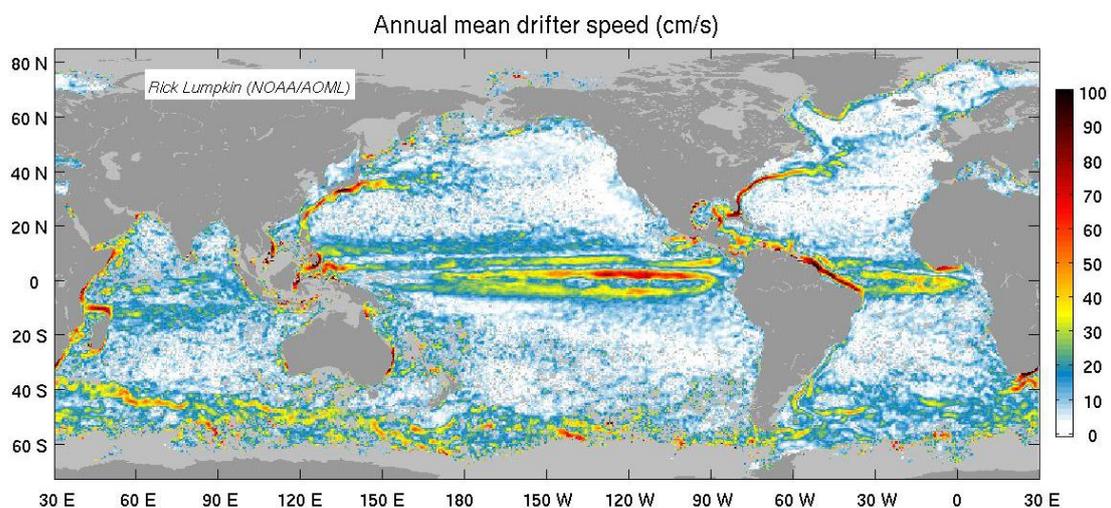


Figura 2.14. Mapa de la velocidad superficial para el océano global obtenido de datos de boyas de deriva (Lumpkin y Johnson, 2013).

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3. MATERIAL Y METODOS

3.1. Boyas de deriva

3.1.1. Descripción de la serie de datos

Las boyas de deriva son una herramienta muy útil para el estudio de la corriente superficial de los océanos. Se les considera un instrumento muy eficiente para la obtención de datos oceanográficos en zonas sin observaciones habituales y de difícil accesibilidad. El presente trabajo, se basa en el estudio de la corriente superficial en torno a las Islas Canarias mediante el uso de boyas de deriva. El periodo de estudio está comprendido entre 1998 y 2012, durante el cual se han desplegado 130 boyas de deriva.

Todas las boyas desplegadas han sido suministradas como parte del Programa Global de Drifter (GDP) y del Programa de Velocidad Superficial (SVP) de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). Han sido varias las empresas colaboradoras que han suministrado las boyas, en concreto han colaborado cinco empresas diferentes: Clearwater, Technocean, Metocean, Dbi y Pacific Gyr. Hay pequeñas diferencias en el diseño de las boyas dependiendo de cada empresa, pero todas cumplen con las especificaciones de fabricación (ver 1.2).

Empresa suministradora	Nº de boyas desplegadas
Clearwater	51
Technocean	47
Metocean	27
Dbi	4
Pacific Gyr	1

Tabla 3.1. Distribución por empresas de las 130 boyas de deriva desplegadas.

El porcentaje de fallo de estos dispositivos es muy bajo, de las 130 boyas desplegadas solo un 2% no funcionaron. Con respecto a la operatividad de los dispositivos, pueden dejar de transmitir por varios motivos: por el cese de la batería, porque encallan en costa o porque son recogidas o enganchadas por algún barco. De las 130 boyas de deriva desplegadas, en el momento en el que se realizó la recopilación y el análisis de los datos, un 4% aún seguían operativas y transmitiendo datos, es por eso que la serie de datos se cortó el 31 de diciembre de 2012. El resto de las boyas para esa fecha ya habían dejado de transmitir, un 55% por lo hicieron por cese de la batería, un 31% de las boyas encallaron en costa y un 8% fueron enganchadas o recogidas.

Tipo de cese	Nº de boyas
Cese de la batería	72
Encallan en costa	40
Enganchadas	10
Siguen operativas	5
Error de funcionamiento	3

Tabla 3.2. Estado de cese y operatividad de las 130 boyas desplegadas.

Con respecto al cese de la batería, el tiempo de operatividad medio estimado para estos dispositivos está en torno a los 15 meses (Sombardier and Nüiler, 1994). De las boyas 130 desplegadas un 36% superaron este periodo. En la siguiente gráfica podemos ver los meses que estuvieron transmitiendo todas las boyas, donde se puede observar que un 7% superan los tres años de operatividad.

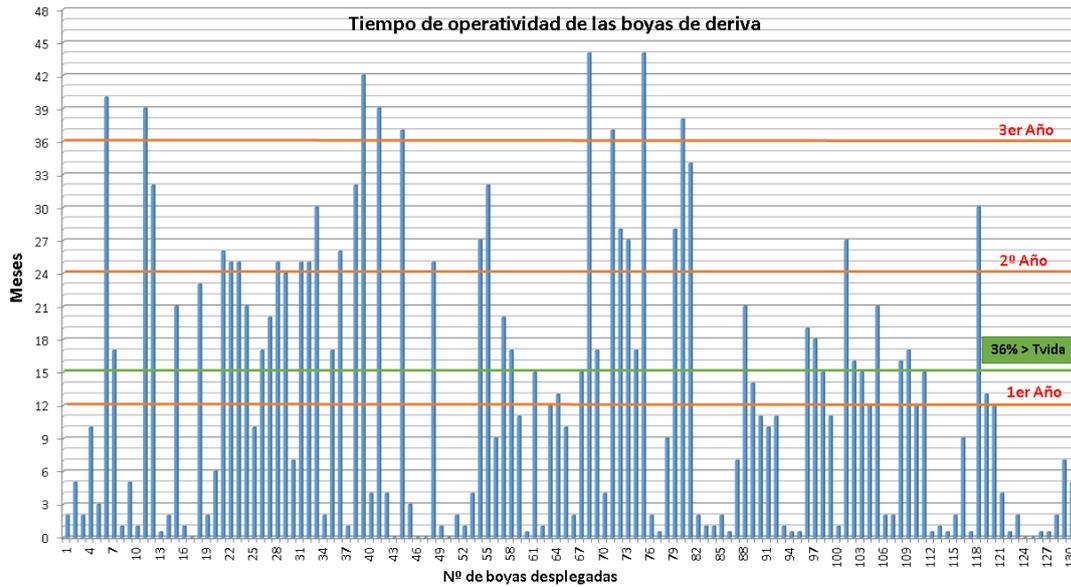


Figura 3.1. Tiempo de operatividad en meses de las boyas desplegadas.

La distribución temporal en los despliegues de las 130 boyas de deriva, ha estado determinado por la operatividad de la Estación Europea de Series Temporales Oceánica de Canarias (ESTOC) y los proyectos que se han desarrollado en torno a la estación, diferenciándose dos periodos concretos. Un primer periodo comprendido entre 1998-2005, durante el cual el proyecto ESTOC estaba operativo y se hacían desplazamientos mensuales a la estación para la realización de campañas oceanográficas, siempre y cuando las condiciones meteorológicas permitiesen el desplazamiento a la zona, así como la logística para la obtención de un barco fuese posible. Durante ese periodo se desplegaron 80 boyas de deriva con una periodicidad mensual. El segundo periodo ha estado comprendido entre los años 2006-2012, durante ese tiempo la estación pasó a tener un carácter más instrumental, mediante fondeos de larga duración, lo que redujo el desplazamiento de embarcaciones a la estación y consecuentemente el despliegue del número de boyas, que pasó a tener una periodicidad estacional. Durante este periodo se desplegaron 50 boyas de deriva.

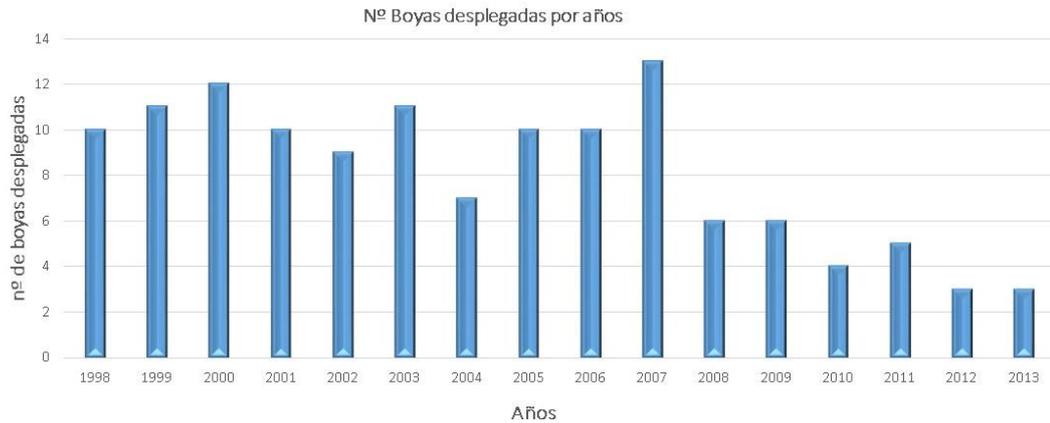


Figura 3.2. Distribución del número de boyas desplegadas por años

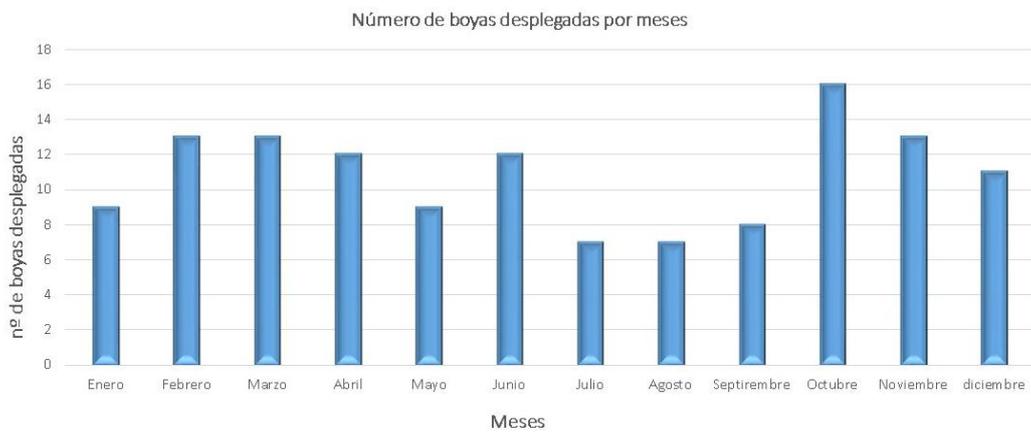


Figura 3.3. Distribución del número de boyas desplegadas por meses

Como adición al programa global de despliegues, se han realizado varios ejercicios en los que se han lanzado varias boyas de deriva al mismo tiempo, con el objetivo de estudiar la dispersión de la corriente superficial en esta región. Esto permitirá evaluar la variabilidad de la corriente, lo que es muy útil para entender la evolución de un objeto que se encuentre a la deriva en la capa superficial del océano. Se han realizado cuatro ejercicios prácticos durante los años 2006 y 2007. En noviembre 2006 se desplegaron tres boyas de deriva de modo simultáneo y en el año 2007 en los meses de febrero, junio y octubre se desplegaron cuatro boyas simultáneamente en cada caso.

Como se ha indicado anteriormente (ver 1.2), para que estos dispositivos sirvan para rastrear la corriente superficial deben tener la draga operativa. En los casos en los que la boya pierde la draga los datos dejan de ser útiles, por lo que esos datos no se han tenido en consideración. Las boyas poseen un sensor de inmersión, el cual determina si la boya ha perdido la draga o no (ver 3.1.3). De las 130 boyas desplegadas un 54% pierden la draga en algún momento, un 40% no la pierden nunca y un 6% dieron error en el sensor que determina la presencia de la draga.

El conjunto de observaciones de la serie completa comprende un total de 231.292 registros, lo que nos da un total de 57.823 días registrados (las boyas registran un dato cada 6 horas). Pero como solo vamos a tener en cuenta los datos de las boyas que no han perdido la draga (Kirwan et al., 1978; Pazan y Niiler, 2001), la serie queda reducida a 86.789 registros lo que nos da un total de 21.697 días registrados. La serie de datos se ve reducida un 63% si tenemos en cuenta la pérdida de la draga. Este porcentaje tan elevado puede atribuirse al uso del nuevo modelos de boyas “mini”(ver 3.1.3) que son menos robustas que las originales y al hecho de que al aumentar el tiempo de vida de estos dispositivos, eso también hace que aumente la probabilidad de perder la draga a largo plazo. En nuestro caso la reducción de la serie no presenta un gran problema, porque muchas de las boyas que pierden la draga (54%) lo hacen cuando se encuentran fuera de nuestra área de estudio, que va a estar centrada en torno al Archipiélago Canario.

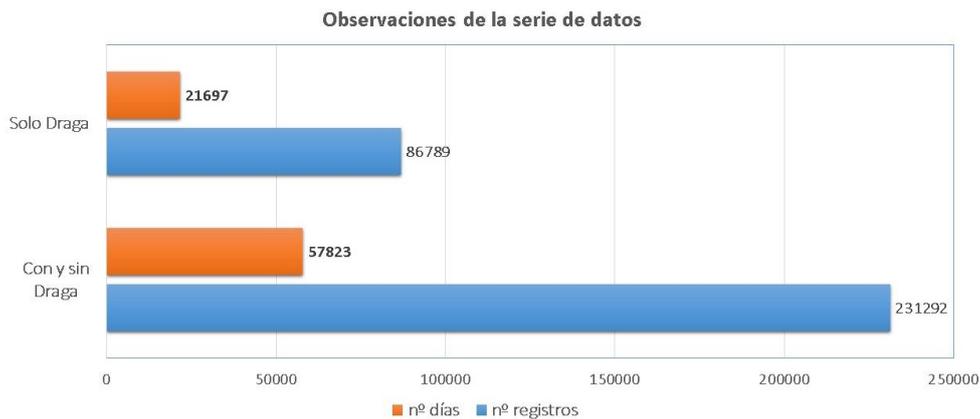


Figura 3.4. Número de registros y números de días registrados para la serie completa y para la serie teniendo en cuenta solo los datos que tienen operativa la draga.

3.1.2. Despliegue en el medio marino

Con respecto a los despliegues de las boyas existen dos métodos para efectuar los lanzamientos, los buques y las aeronaves. Para conseguir una utilización eficaz de los recursos disponibles se requiere de una buena coordinación de las actividades y un buen control de la logística. La coordinación de los lanzamientos se ha llevado a cabo por parte del Instituto Canario de Ciencias Marinas desde el comienzo del proyecto en 1998 hasta el año 2010. A partir de ese año la coordinación de los lanzamientos se ha realizado por parte de La Plataforma Oceánica de Canarias.

El lanzamiento desde buques no se ajusta a ninguna norma especial, solo se deben tomar precauciones en el momento en el que se lanza la boya para que no se dañe el equipo ni corra peligro la tripulación. Los buques han sido el medio más usado para este tipo de operaciones y el único factor crítico e imprevisible a tener en cuenta es el factor meteorológico. Las boyas pueden lanzarse desde popa y pueden llegar a resistir caídas de aproximadamente 12 metros sin tener problemas en su funcionamiento. Las aeronaves han pasado a ser un recurso muy útil en los últimos años, constituyendo un recurso muy flexible. La principal diferencia que presentan respecto al despliegue desde embarcaciones, es la necesidad de usar un equipo de paracaídas enganchado a la boya para que en el dispositivo no sufra daños al contacto con el agua.

Para las 130 boyas de deriva desplegadas durante este estudio han sido utilizados los dos métodos de despliegue. Los buques han sido el medio más empleado en un 85% de los casos, las aeronaves han empezado a usarse más en los últimos años (un 15%). Se ha contado con numerosos tipos de embarcaciones diferentes, buques oceanográficos, barcos de la Armada Española, así como barcos de oportunidad (pesqueros o barcos de otras características que han permitido el desplazamiento a la estación para el despliegue de las boyas). En los últimos años se ha contado con la colaboración del Centro Coordinador de Rescates de Canarias (RCC-Canarias) lo que ha permitido hacer uso de los helicópteros del Ejército del Aire para el despliegue de las boyas. Debido a la flexibilidad de vuelo que permiten los helicópteros no ha sido necesario el uso de paracaídas para los lanzamientos, porque permite desplegar las boyas desde muy poca altura sin que el dispositivo sufra daños.

En total se han usado unos 20 medios de despliegues diferentes para el lanzamiento de las boyas 130 boyas de deriva.

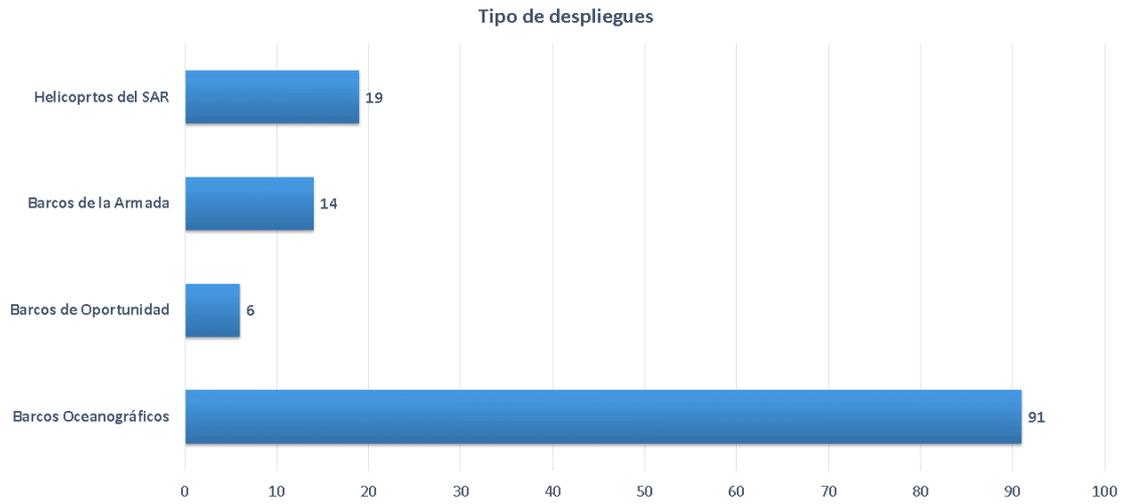


Figura 3.5. Número de boyas desplegadas desde las diferentes plataformas usadas, marítimas y aéreas.

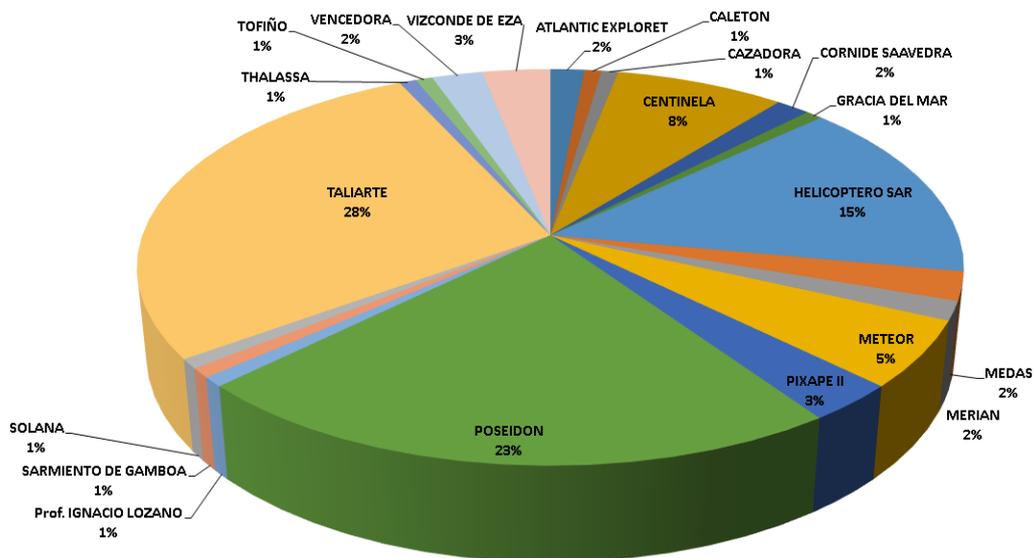


Figura 3.6. Porcentaje de despliegues en relación al tipo de embarcación o aeronave usado.

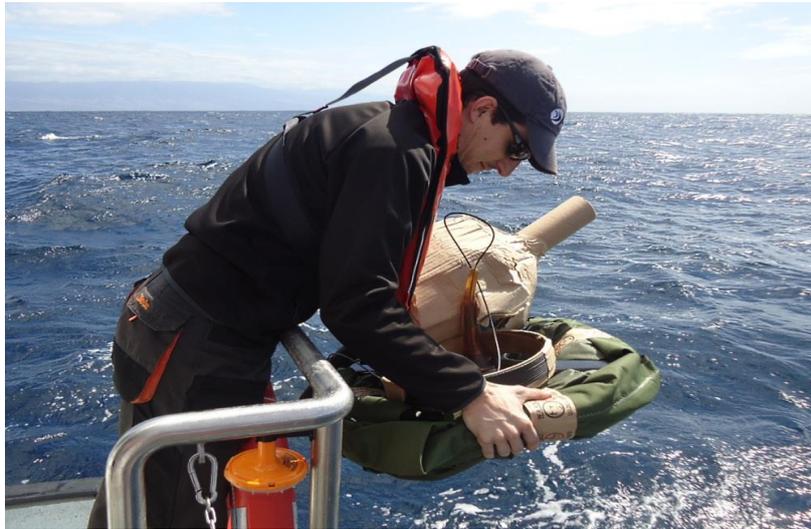


Figura 3.7. Fotos durante el despliegue de varias de las boyas de deriva desde embarcaciones



Figura 3.8. Fotos durante el despliegue de varias de las boyas de deriva desde helicópteros del Servicio Aéreo de rescates del Ejército del Aire

3.1.3. Especificaciones técnicas de las boyas de deriva

Todas las boyas de deriva usadas en este trabajo son del modelo *Surface Velocity Program* (SVP) y han sido fabricadas siguiendo las especificaciones establecidas por Syrbrandy y Niiler (1992), para que sigan el movimiento de la columna de agua y no se vean afectados por el campo de vientos superficial. Actualmente existen dos versiones homologadas de boyas de deriva de diferente tamaño. Un modelo original que es relativamente más grande y más costoso y una nueva versión con la que se está trabajando actualmente que es la denominada “mini”. De las 130 boyas de deriva desplegadas en este estudio, las 57 primeras son del primer modelo (desplegadas entre 1998-2002) y las 73 restantes son del modelo “mini” (desplegadas entre 2003-2012). A continuación se muestran los esquemas de ambos modelos.

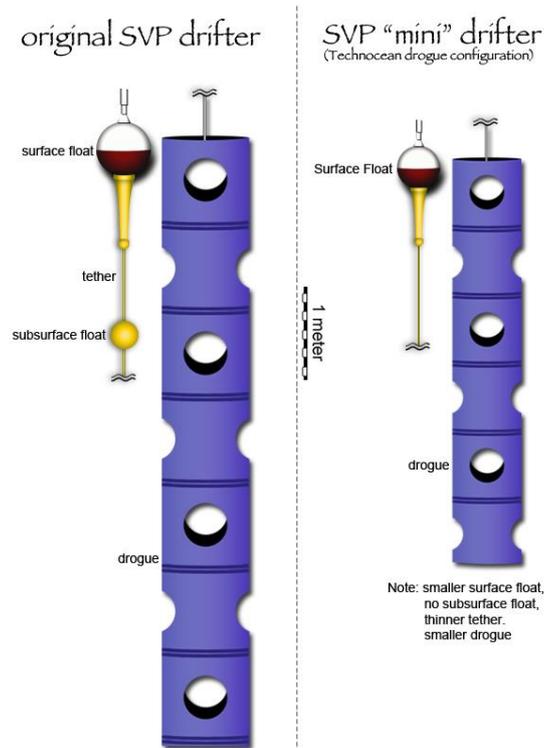


Figura 3.9. Esquema de la boya original y el nuevo modelo mini de boya de deriva.

Las principales diferencias entre el modelo original y el “mini” se corresponden con el tamaño de la boya de superficie y la dimensión de la draga, que en el segundo modelo han sido reducidos, al igual que el amarre que es más fino. Otra diferencia es que las boyas “mini” no disponen de boya subsuperficial.

A continuación se pasan a describir las características de diseño establecidas por Syrbrandy y Nüiler (1992) que deben cumplir las boyas de deriva.

El flotador de superficie. El diseño esférico del flotador superficial reduce el efecto de las ondas de gravedad (Nüiler et al., 1987, 1995). Su tamaño varía de 30.5 centímetros de diámetro de la mini-SVP a 40 centímetros el antiguo modelo. Inicialmente estos flotadores superficiales estaban hechos de fibra de vidrio pero actualmente todos los fabricantes se han pasado a los flotadores de plástico (polyurethano). El flotador contiene las baterías que se encuentran apiladas en 4-5 paquetes con 7-9 baterías cada uno (D-células alcalinas). En el flotador se encuentra el transmisor de ARGOS que se activa quitando un imán que se encuentra en la superficie del flotador. Las boyas poseen un termistor para medir la temperatura superficial, que se encuentra localizado en la base del flotador para evitar el calentamiento directo. Algunas boyas son equipadas con instrumentos adicionales como barómetros, anemómetros o sensor de salinidad. Las boyas de deriva usadas en este estudio solo tienen un sensor de temperatura. Las boyas también poseen un sensor de inmersión, cuya función es detectar la presencia de la draga (el porcentaje de inmersión de la boya está relacionado con la presencia de la draga), uno de los fabricantes (Clearwater) ha reemplazado el sensor de inmersión por un sensor de tensión que mide más directamente la presencia de la draga. La mayoría de los fabricantes aplican una pintura de óxido de cobre rojo a la mitad del flotador para reducir el crecimiento biológico sobre la boya.



Figura 3.10. Foto de una de las boyas de deriva antes del despligue.

El Amarre. Un alambre protegido de polipropileno que conecta el flotador de superficie a un flotador subsuperficial, conectado con una traba de 5.6 milímetros en el modelo inicial y de 3.2 milímetros en la mini-SVP.

La draga. Está centrada a 15 metros, lo que hace que la boya se mantenga acoplada a la corriente superficial, además tiene la función de atenuar los efectos de turbulencia de pequeña escala. El exterior de la draga está compuesto por una tela de nylon, en el modelo inicial contiene 7 secciones de 92 centímetros de largo y 92 centímetros de diámetro, con una longitud total de 6.44 metros. La mini-SVP todavía no se ha regularizado y hay variaciones dependiendo del fabricante. Pueden estar compuestas por 4 secciones (Pacific Gyre) o 5 (Marlin-Yug) manteniendo las dimensiones del modelo original, o 4 (Clearwater) y 5 (Technocean) con dimensiones de 61 centímetros de diámetro y 1.22 metros por sección. A lo largo de la draga hay unos anillos de polipropileno unidos por un alambre lo que sirve de apoyo y mantiene la forma cilíndrica de la estructura, el anillo de la superficie está lleno de espuma de poliuretano para proporcionar flotabilidad y reducir las oscilaciones verticales cuando existe una tensión baja en la estructura. Cada sección de la draga tiene dos agujeros colocados perpendicularmente, inicialmente de 46 centímetros y de 30 centímetros en la mini-SVP, para permitir el paso del flujo.



Figura 3.11. Foto de una boya de deriva con la draga desplegada.

Como se comentó en el apartado de estandarización (ver 1.2) las características de diseño más importantes son la tensión entre la boya de superficie y la draga (Niiler et al., 1987). La deriva se reduce si se evita el acoplamiento de la boya con el campo de olas, esto se logra minimizando la tensión de la boya superficial y la draga. El cociente área-arrastre (R) definido como el cociente entre el área de arrastre de la draga y el área de arrastre de todos los componentes de la boya, indica que cuanto mayor sea ese cociente mejor capacidad tendrá la boya para seguir la parcela de agua. Como se ha comentado, las dragas de las boyas de deriva usadas en este trabajo son las Holey-Sock, que tienen una proporción de área de arrastre de $R=37$.

Con estas especificaciones técnicas, la boya va a poder derivar con volúmenes de agua verticalmente integrados sobre una draga de 6-7 metros de longitud, centrada a 15 metros de profundidad. Las boyas sin draga pierden la capacidad para seguir la parcela de agua sobre todo si se dan condiciones de vientos fuertes. Pazan y Niiler (2001) examinaron un conjunto de más de 2000 boyas, incluyendo boyas que habían perdido la draga. Mediante un modelo de regresión múltiple calcularon el movimiento residual de las boyas y encontraron una relación lineal con el viento para los casos en los que se perdía la draga.

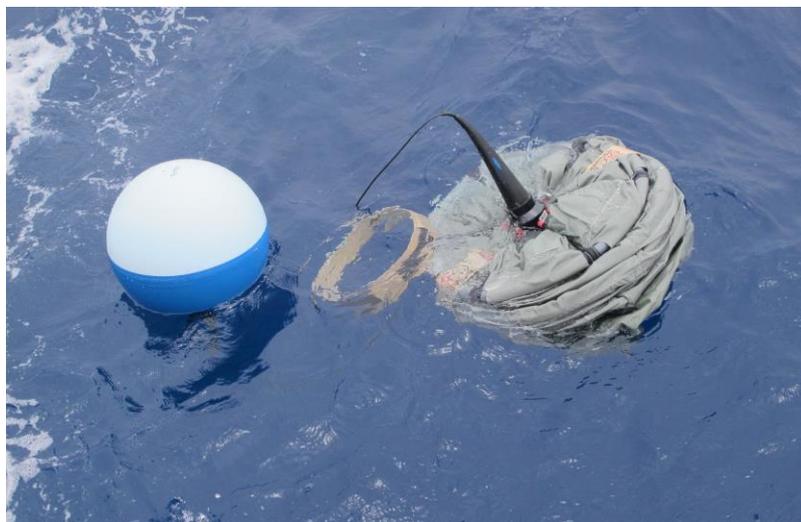


Figura 3.12. Foto de una boya de deriva desplegada en el agua.

3.1.4. Transmisión de los datos vía satélite

Desde que la boya se activa y se lanza al mar está empieza a emitir datos, estos quedan almacenados hasta que alguno de los satélites de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) sobrevuele la zona en la que se encuentre, descargándolos y enviándolos posteriormente al Centro de Control de Argos en tierra. El sistema Argos es un sistema mundial de localización y acopio de datos de diversas plataformas, como las boyas descritas, estas transmiten automáticamente mensajes a receptores de Argos en los satélites meteorológicos operacionales de la NOAA. Los satélites retransmiten las informaciones en bruto a las estaciones receptoras en tierra, en donde los datos recibidos son procesados y retransmitidos a su vez a los propietarios de las plataformas. El Sistema Argos está integrado por tres componentes que se pasan a describir a continuación.

1) Un conjunto de plataformas. Que pueden ser fijas o móviles, instaladas por los usuarios en el mar, tierra o el aire, que transmiten en forma independiente. Cada plataforma está integrada por los sensores, los aparatos electrónicos de tratamiento y el terminal de transmisión de la plataforma de Argos. Este último está compuesto por una antena, un modulador de alta frecuencia (RF) y amplificador de potencia, una dotación lógica de generación de mensajes, una unidad de interconexión del sensor, un oscilador estable y una fuente de energía. El transmisor satelital tiene una frecuencia de operación de 401.65 MHz \pm 30 kHz.

2) Los satélites del NOAA en Órbita simultánea. Cada uno de los cuales tiene a bordo un sistema de acopio y ubicación de datos, que reciben los mensajes de la terminal de transmisión según un acceso al azar. Posteriormente los datos se someten a los procedimientos de separación, codificación cronológica y ubicación en formularios y los retransmiten a las estaciones terrestres. La separación cronológica de los mensajes se logra gracias a la desincronización de las transmisiones y la utilización de diferentes periodos de repetición. En cuanto a su frecuencia, la separación de los mensajes se logra por medio de diferentes desplazamientos doppler en la frecuencia de la onda portadora recibida de los diferentes terminales de transmisión. El sistema de Argos puede captar hasta cuatro mensajes simultáneos, siempre que estén separados en su frecuencia. Para asegurar su compatibilidad con los equipos de Argos y no interferir con el resto de los terminales, todo

diseño de terminal de transmisión debe ser aprobado por el servicio Argos. Cada satélite capta instantáneamente, en todo momento, un área del globo de unos 5.200 Km de diámetro, en cada órbita abarca el Polo Norte y el Polo Sur.

3) Las estaciones terrestres y los centros mundiales de tratamiento. Ubicados en Toulouse (Francia) y Maryland (Estados Unidos) son donde los datos son recuperados, procesados y distribuidos a los usuarios. En primer lugar se realiza la decodificación de los mensajes y procesamiento de los datos de los sensores. En segundo lugar la estimación de la ubicación de los terminales de transmisión a partir de los deslizamientos doppler y los datos orbitales. Y por último el almacenamiento de todos estos resultados del tratamiento en archivos informáticos.

Mediante las terminales de los usuarios locales se pueden obtener los datos en tiempo real. Un mensaje con datos procedentes de una plataforma puede tener una extensión variable en función del número de sensores que posea y es posible transmitir hasta 256 bits de datos recogidos con los sensores.

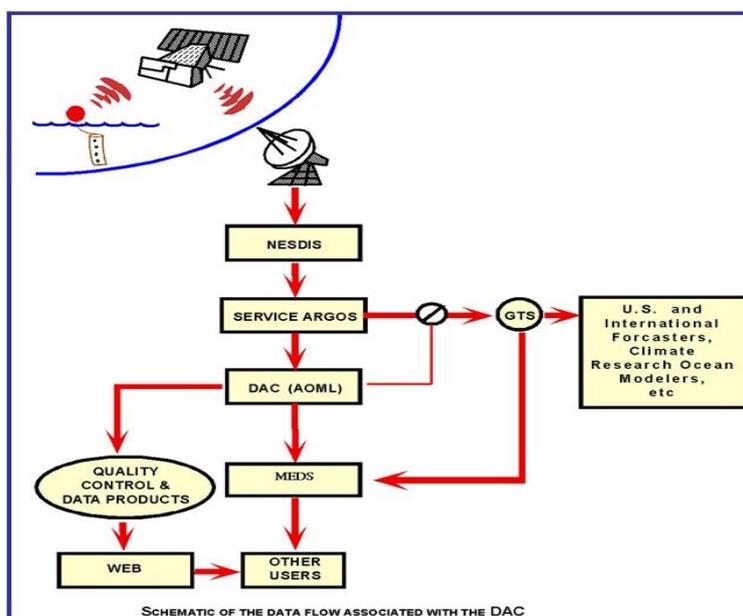


Figura 3.13. Esquema del flujo de datos asociado al *Data Assembly Center* (DAC).

3.1.5. Tratamiento de los datos

El procesado de los datos se lleva a cabo en el *Data Assembly Center* (DAC) e incluye la adquisición de los datos brutos y el control de calidad de los mismos. Mediante el localizador de cada una de las boyas se identifica cuando dejan de transmitir o cuando han perdido la draga. Cada observación viene dada por un instante de tiempo (que ha sido interpolado cada 6 horas), una posición geográfica en latitud y longitud, la componente norte-sur y este-oeste de la velocidad, la intensidad de la velocidad y la temperatura de la superficial del mar.

Campo	Descripción
id	AOML buoy identification number
date	Date
time	Time
lat	Latitude (-90, 90) (N => +, S => -)
lon	Longitude (-180, 180) (E => +, W => -)
t	Temperature (degrees Celsius)
ve	Eastward velocity (cm/s)
vn	Northward velocity (cm/s)
speed	Speed (cm/s)

Tabla 3.3. Descripción del formato de los datos suministrados por el *Data Assembly Center*.

Todos los datos son suministrados por el Programa Global de Drifters (PGD) mediante un enlace web:

<http://www.aoml.noaa.gov/phod/trinanes/xbt.html>.

Los datos pueden estar disponibles en dicho enlace aproximadamente dos meses después del despliegue de la boya. Durante ese periodo los datos son interpolados y pasan un control de calidad que se describe a continuación.

3.1.5.1. Control de calidad

La técnica para el control de calidad de los datos fue desarrollada por Hansen y Poulain (1996). El método se basa en el análisis de la intensidad de velocidad de observaciones consecutivas en el tiempo. La velocidad media entre dos observaciones consecutivas temporalmente puede estimarse mediante diferencias finitas:

$$u_j = \frac{1}{t_{i+1} - t_i} \int_{t_i}^{t_{i+1}} u_j(t) dt = \frac{1}{t_{i+1} - t_i} \int_{t_i}^{t_{i+1}} \frac{\partial x_j(t)}{\partial t} dt$$
$$\cong \frac{x_j(t_{i+1}) - x_j(t_i)}{t_{i+1} - t_i} \quad (ec.3.1)$$

Siendo $j\{1,2\}$ el índice que expresa las componentes de cualquier sistema ortogonal contenido en el plano cartesiano, x la posición de la boya y i el índice que indica el paso temporal. Los valores estimados mediante la ecuación (3.1) se consideran erróneos si superan un valor umbral de velocidad previamente establecido. Este valor depende de las características de la circulación de la región en estudio y de los histogramas de velocidad observados de trayectorias individuales y del conjunto de todas las trayectorias utilizadas para el análisis (Hansen y Poulain, 1996).

Una vez identificado un valor como erróneo debe decidirse si ambas posiciones consecutivas o una posición es la errónea. La decisión no es trivial, dado que el intervalo temporal entre posiciones consecutivas no es regular. Por lo tanto, cada trayectoria individual se analiza mediante la combinación de un análisis progresivo y regresivo en el tiempo. El método comienza con el análisis progresivo marcando la primera observación de la trayectoria como buena. Si la velocidad estimada con el primer par de puntos excede el valor umbral, se marca el segundo punto de la serie como malo y se repite el cálculo de velocidad con los siguientes puntos hasta que la velocidad no supere el valor máximo permitido, marcando este punto como bueno y todos los puntos anteriores, si los hubiese, como malos. Se repite el análisis, avanzando en el tiempo, tomando ahora como punto inicial el último punto identificado como bueno. Se avanza en el tiempo hasta completar toda la trayectoria. Luego se repite el análisis hacia atrás en el tiempo. Todos los puntos identificados como buenos en ambas direcciones se identifican como buenos globalmente y los puntos identificados como malos en al menos una dirección se identifican como malos globalmente.

Para cada grupo de puntos considerados malos globalmente, se cuenta la cantidad de puntos considerados buenos en cada dirección y se reemplazan los identificadores globales por los identificadores del análisis progresivo o regresivo que contenga mayor número de identificadores buenos. Por último se eliminan los puntos que queden con identificadores globales malos.

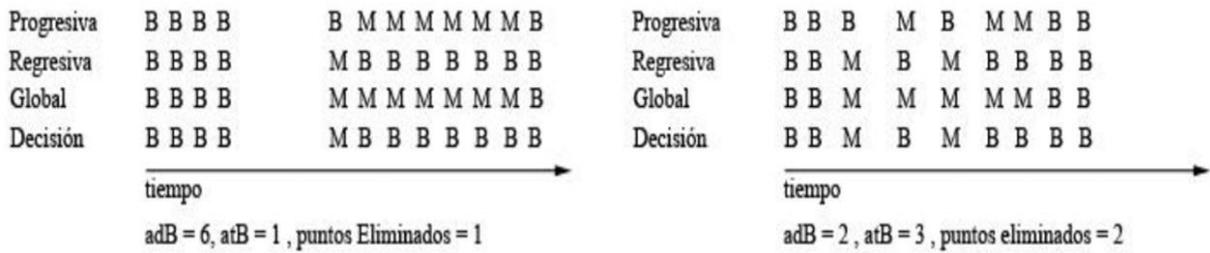


Figura 3.14. Ejemplo de la lógica de edición de datos erróneos por Hansen y Poulain (1996).

En la Figura 3.14, M y B indican puntos identificados como malos y como buenos respectivamente, adB y atB indican la cantidad de puntos buenos dentro de un grupo de puntos malos globales en el análisis progresivo y regresivo respectivamente. La separación entre los puntos es proporcional a la diferencia temporal entre ambos. Los análisis progresivos y regresivos combinados evitan la eliminación innecesaria de puntos.

3.1.5.2. Interpolación temporal y análisis de error

Debido al tipo de recepción del sistema Argos las posiciones están distribuidas irregularmente en el tiempo, lo que es un problema a la hora de realizar los diferentes tipos de análisis. Hansen y Poulain (1996) aplicaron una técnica de interpolación óptima, interpolando uniformemente con un intervalo de 6 horas mediante el método Kriging

El método Kriging, a diferencia de otros métodos de interpolación, está basado en modelos estadísticos que incluyen la autocorrelación, es decir, las relaciones estadísticas entre los puntos medidos. Presupone que la distancia entre los puntos de la muestra refleja una correlación espacial, la herramienta ajusta una función matemática a los puntos dentro de un radio específico para determinar el valor de salida para cada ubicación. El proceso tiene varios pasos, entre los que se incluyen, el análisis estadístico de los datos, el modelado de variogramas, la creación de la superficie y la exploración de la superficie de varianza. El método pondera los valores medidos circundantes para calcular una predicción de una ubicación sin mediciones (Oliver, 1996).

Hansen y Poulain (1996) consideran a la longitud y la latitud como variables independientes. Los valores interpolados son una combinación lineal de un número de observaciones cercanas en el tiempo:

$$\hat{x}_j^* = \sum_{i=1}^n w_{ij} x_{ij} ; j = 1,2 \quad (ec.3.2)$$

Siendo x^* el valor estimado, x_{ij} los valores observados y j el índice asociado a la componente zonal y meridional. Los pesos, w_{ij} , se eligen de manera que se minimice el valor cuadrático medio de la diferencia entre los valores observados en los puntos de interpolación y las estimaciones, lo que se busca minimizar es:

$$\sigma_{kj}^2 = \langle (\hat{x}_j - \hat{x}_j^*)^2 \rangle \quad (ec.3.3)$$

La cantidad de observaciones, n , utilizadas en la estimación de x^* fue fijada en 10 como un valor de compromiso entre la calidad del resultado y el tiempo de cómputo.

Los métodos de interpolación óptima utilizados usualmente en oceanografía, utilizan como restricción para la obtención de los pesos, w_{ij} , la función de auto-correlación de la variable a interpolar. En este caso como la variable de interés es la posición geográfica se utilizó la siguiente función de estructura:

$$S_{lm} = \frac{1}{2} \langle (x_l - x_m)^2 \rangle = \frac{1}{2} \langle [x(t_l) - x(t_m)]^2 \rangle$$

(ec.3.4)

El principal problema en la especificación de la función de estructura, es la existencia de dos regímenes diferentes de transmisión de datos, generando intervalos de tiempo con observaciones frecuentes e intervalos prolongados sin observaciones, donde al menos la mitad de los valores a interpolar no poseen observaciones durante 24 horas. En la siguiente figura se muestra un ejemplo de los resultados de una interpolación obtenida por Hansen y Poulain (1996).

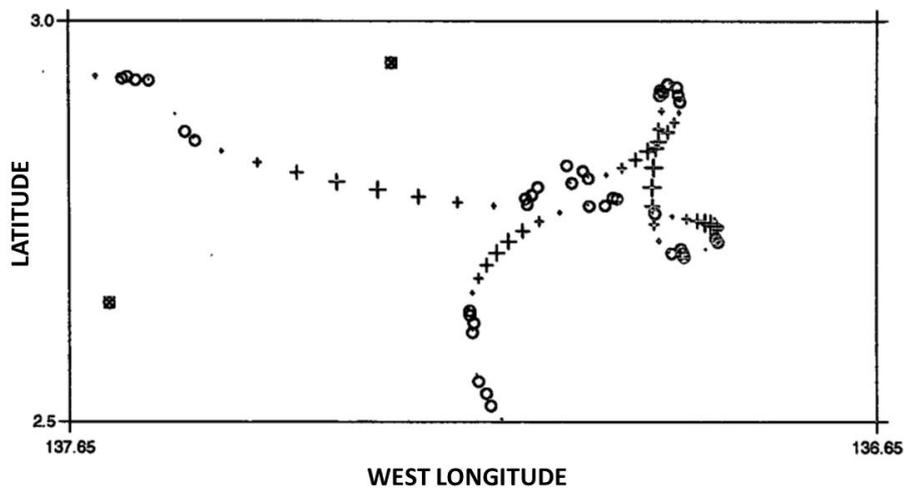


Figura 3.15. Ejemplo ilustrativo de los resultados de interpolación de Hansen y Poulain (1996). “o” representa los datos de posición recibidos del servicio de Argos y las “+” representa los puntos interpolados.

3.2. Datos de satélite

Como complemento al estudio de la corriente superficial se han recopilado datos de viento medido a 10 metros de la superficie y datos de la de corriente geostrófica obtenidos desde satélites. En la siguiente tabla se muestran las fuentes de donde se ha obtenido los datos y las instituciones responsables de su distribución.

Parámetros Oceanográficos	Distribución de los datos	Institución responsable
Viento a 10m de superficie	ftp://podaac.jpl.nasa.gov/pub/ocean_wind/quikscat	Jet Propulsion Laboratory (NASA), California Institute of Technology, Physical Oceanography, Distributed Active Archive Center (DAAC).
Corriente Geostrófica	ftp://ftp.cls.fr/pub/oceano/AVISO	Collected Localisation Satellites (CLS)

Tabla 3.4 Institución y acceso a la distribución de los datos de viento y corriente geostrófica.

3.2.1. Datos de viento

La obtención del campo de viento (a 10 metros de la superficie) ha sido mediante el dispersómetro Seawinds instalado en el satélite QuickScat. Éste satélite fue lanzado el 19 de junio de 1999, tiene una órbita polar entre los 70°S y 70°N a 800 kilómetros de altura, cruzando el ecuador cada 2 horas. A medida que se desplaza muestrea una banda de 600 kilómetros de ancho, el mismo punto sobre el océano es muestreado cada 24 horas. El sensor Seawinds es un dispositivo de microondas activo, que mide la energía de radar dispersada por una gran área de superficie, que ha sido iluminada previamente por un largo pulso de energía a una frecuencia dada. La amplitud de la señal retornada se va a considerar como una medida empírica de la rugosidad de la superficie, esta señal de retorno puede relacionarse con la velocidad del viento superficial y su estrés. Las olas producidas por el viento sobre las superficies del océano van a generar una rugosidad que va a dispersar la energía transmitida por el aparato.

Si el océano se encuentra en calma la mayor parte de la energía es absorbida, por el contrario si el océano está ondulado parte de la energía retorna al instrumento y es convertida en datos digitales que posteriormente son transformados en magnitud y dirección del viento (Pérez-Marrero, 2005).

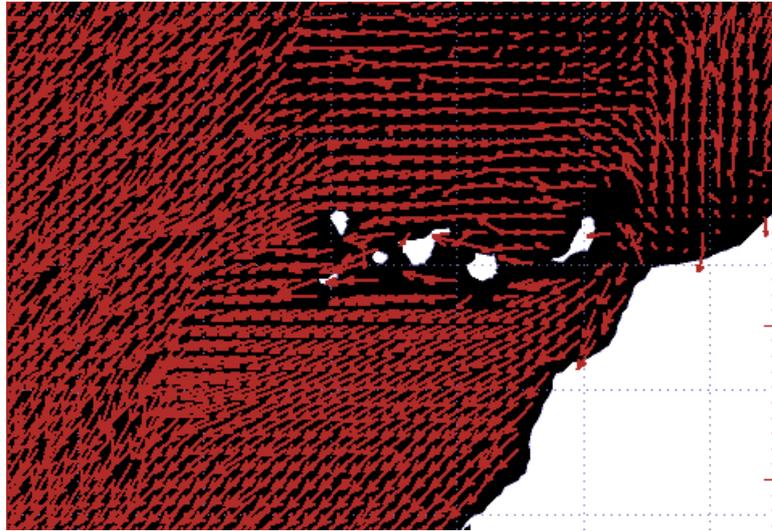


Figura 3.16. Datos de viento a 10 metros de la superficie obtenidos del QuickScat del día 7 de agosto de 2002.

3.2.2. Datos de corriente Geostrófica

La corriente geostrófica es obtenida por altímetros instalados a bordo de los satélites (AVISO). Mediante esta técnica se puede medir la altura de los océanos con una gran precisión, lo que permite obtener información sobre las corrientes geostróficas, dado que la pendiente de la superficie del mar está directamente relacionada con la dinámica del océano a través de los cálculos del flujo geostrófico. La información obtenida proporciona una buena estimación de la velocidad geostrófica superficial con una resolución espacial que resuelve los principales jets, frentes y remolinos, aunque presenta limitaciones en la resolución temporal, ya que son necesarios alrededor de diez días para cubrir todo el archipiélago. Afortunadamente las variaciones del campo de velocidad geostrófica son lo suficientemente lentas como para que estos datos sean útiles para muchos de los fenómenos de mesoescala que se quieren estudiar.

Mediante la altimetría por satélite se puede obtener información en un breve intervalo de tiempo para una región muy extensa del océano. El fundamento de la altimetría consiste en que un radar mide la distancia que hay desde el transmisor del satélite a la superficie del mar y lo convierte en altura de la superficie del mar con respecto a un elipsoide de referencia. Mide el tiempo que tarda un pulso de radiación electromagnética, en el rango de las microondas, en ir y volver al transmisor una vez que ha sido reflejado por la superficie del mar. Si se conoce la velocidad con que viaja el pulso se puede calcular la distancia del satélite a la superficie del mar. Como trabaja en el rango de las microondas no es sensible a las condiciones meteorológicas y trabaja con nubes, lo que presenta una gran ventaja (Pérez-Marrero et al., 2005).

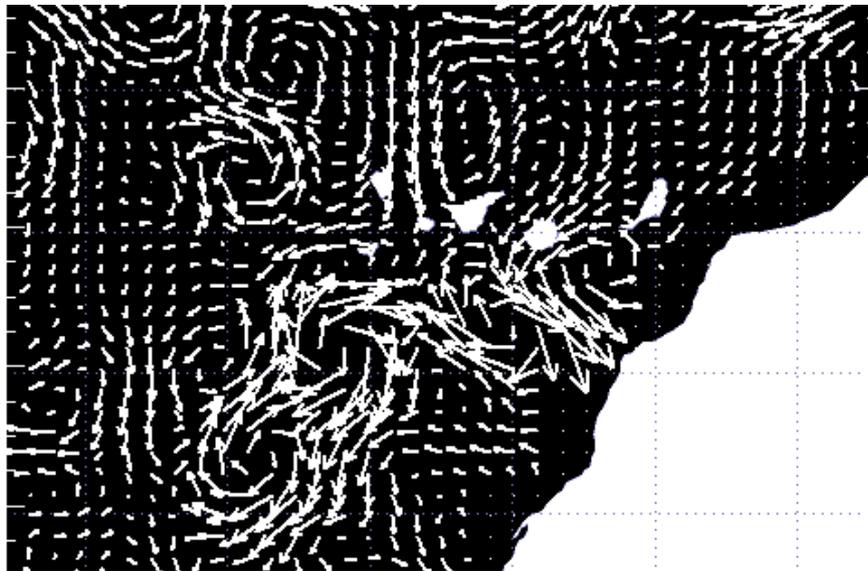


Figura 3.17. Datos de corriente geostrofica obtenido del altímetro de AVISO para el día 7 de agosto de 2002.

3.2.3. Sistema de Monitorización -SIMOM

El análisis de los datos de viento superficial y de la corriente geostrófica ha sido llevado a cabo mediante un sistema integrado de información oceanográfica, el Sistema de Monitorización Oceánica Macaronesia (SIMOM) desarrollado por Pérez-Marrero (2005). SIMOM surge por la diversidad de instrumentos, sistemas y fuentes de observación ambiental que actualmente existen, que hace que los formatos y características de la información sean muy variados, lo que conlleva que la simple comparación de dos parámetros sea muy complicado en la mayoría de los casos. El desarrollo de esta herramienta se basa en un sistema de monitorización integrado, que aúna información de forma comprensible y coherente. Esta herramienta proporciona en tiempo casi real información sobre diferentes parámetros medioambientales, obtenidos principalmente desde sensores instalados a bordo de satélites. SIMOM permite usar de modo coherente diferente tipo de información sobre áreas concretas, permitiendo tener en un formato uniforme todas las variables que se quiera estudiar.

Sensor de medida	Resolución temporal	Cobertura de datos
Dispersómetro	Diario y semanal	1999-actualidad
Altímetro	Semanal	2001-actualidad

Tabla 3.5. Cobertura y resolución de los sensores usados para la obtención de los diferentes parámetros.

El sistema se articuló como la unión de una base de datos que incluye información geográfica y temporal, con un conjunto de herramientas específicas desarrolladas en IDL 6.1 (Interactive Data Language), que se basan en la ingestión y adaptación de los datos, lo que permite la búsqueda y selección de la información, incluyendo herramientas de cálculo. El acceso a la información se efectúa por medio de búsquedas en el dominio espacial, temporal, instrumental o paramétrico con salidas gráficas y numéricas fácilmente entendibles.

El enfoque del sistema de monitorización es multiparamétrico y multiescala, admitiendo datos de varios tipos de sensores, medidas in situ y permitiendo el estudio desde la cuenca atlántica hasta la mesoescala del archipiélago. La integración de la información en el sistema implica dos aspectos esenciales, la fusión de la información y el análisis de la misma. El proceso de fusión de la información consiste en la adecuación de los distintos conjuntos de datos a una estructura común que permita explotar las sinergias entre ellos. El análisis permite extraer la información más relevante, ya sea de tipo estadístico o descriptivo, con la creación de escenarios y diferentes resultados gráficos. Para la fusión de datos de diferente resolución espacio-temporal se usa interpolación bilineal como técnica base, en el dominio del espacio y la interpolación lineal en el dominio del tiempo. El análisis objetivo implica estadísticas y análisis de series temporales (en los dominios de tiempo y de frecuencia). El grupo de programas de adaptación de SIMOM se encarga de las tareas de adaptación de los datos, tales como asignar nombres, rellenar los huecos en los datos. Una vez los datos son leídos y adaptados el sistema permite el tratamiento geoestadístico de los mismos. El sistema permite seleccionar y visualizar un conjunto de datos especificando la fecha, el parámetro y zona que queremos estudiar, obteniéndose como resultado la imagen promedio que mejor se asemeje a las condiciones propuestas.

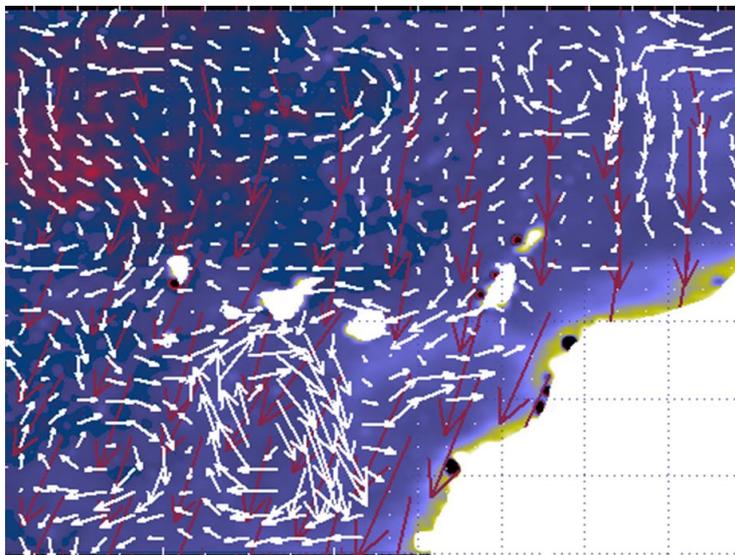


Figura 3.18. Ejemplo de la integración de datos obtenidos de SIMOM. Viento (flechas rojas), la velocidad de la corriente geostrofica (flechas blancas). (Pérez-Marrero, 2005).

Esta herramienta da una visión más completa de la que se tendría al estudiar cada una de las series de datos por separado. Para el periodo comprendido entre 2002 y 2005 los datos de las boyas, la corriente geostrófica y el viento se integraron en la base de datos de SIMOM, lo que permitió estudiar estas tres variables en conjunto. Las herramientas de las que dispone el sistema de monitorización, permite extraer de la base de datos el campo geostrófico y del campo de viento para cada posición de la trayectoria de una boya.

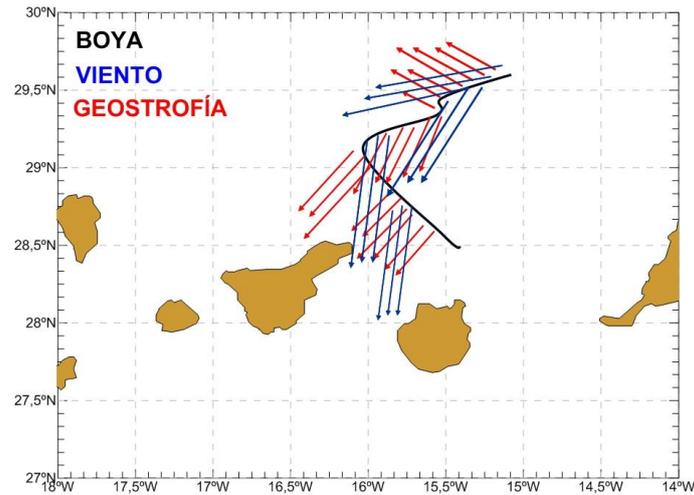


Figura 3.20. Ejemplo de los datos extraídos mediante SIMOM. El viento (azul) y la velocidad de la corriente geostrófica (rojo) para cada instante de la boya (negro).

Previamente a la integración de los datos de las boyas en SIMOM, estos tuvieron que ser promediados debido a que la resolución temporal es diferente para cada uno de los parámetros que se quiere analizar. En el caso de las boyas la resolución es de horas, para el caso del viento la resolución es diaria y la corriente geostrófica presentan una resolución semanal. Por ello se realizaron promedios diarios y semanales para los datos de las boyas de deriva. En las siguientes figuras se muestra los promedios obtenidos para una de las boyas estudiadas.

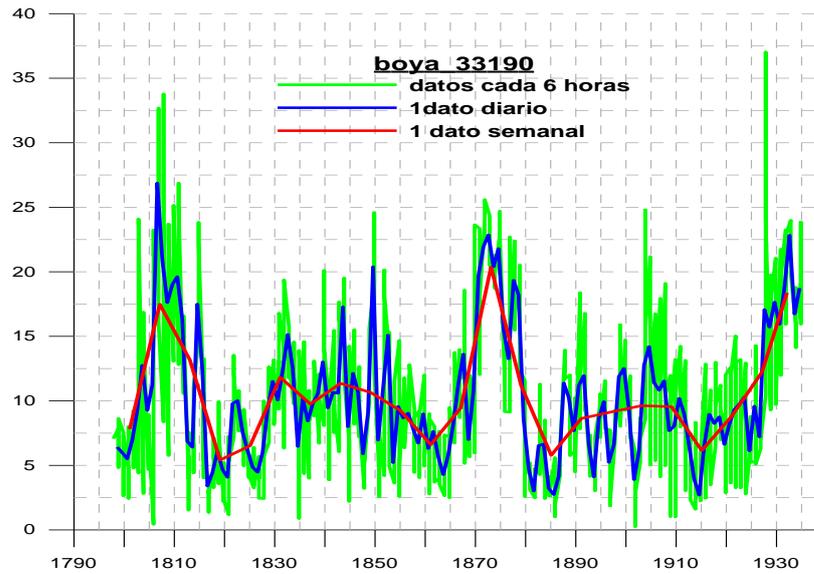


Figura 3.19. Gráfica de los promedios diarios y semanales obtenidos para una de las boyas de deriva

Tras extraer de la base de datos de SIMOM el campo de vientos y corriente geostrófica para cada una de las boyas estudiadas, se realizó un estudio de correlación entre las velocidades de dichas variables. Se parte del supuesto que las relaciones entre las variables es lineal, y se realiza un estudio de correlación de la velocidad de la boya con la velocidad del viento por un lado y con la velocidad de la corriente geostrófica por otro. Del mismo modo, también se realiza un estudio de regresión lineal múltiple entre las tres variables. El objetivo es poder determinar las relaciones que existen entre estas variables y cuantificar cual es la contribución de viento y de la corriente geostrófica al desplazamiento real de la boya.

3.3. Modelos numéricos

Actualmente una de las herramientas más útiles para avanzar en la comprensión de la dinámica marina es la simulación numérica. Mediante esta, podemos simular situaciones que nos permitan entender el funcionamiento del océano para su posterior diagnóstico y posible predicción. Actualmente los servicios basados en modelos numéricos proporcionan predicciones de numerosas variables (vientos, oleaje, corrientes, etc.). El desarrollo de estos servicios requiere de un esfuerzo en lo relativo a técnicas de modelado, a la asimilación de datos y anidamiento de modelos.

La modelización numérica tiene verdadero sentido cuando resulta ser un complemento a las medidas de campo, siendo imprescindible contar con largas series de datos actualizadas con las que alimentar los modelos y a la vez evaluar su grado de acierto. Las trayectorias de las boyas de deriva desplegadas, han servido para comparar los resultados de predicción de corrientes obtenidos de diferentes modelos numéricos.

Durante el desarrollo de esta tesis, se ha trabajado con dos modelos numéricos de predicción y ambos pasan a ser descritos a continuación. Estos modelos han estado disponibles en los casos que ha sido necesario colaborar con las instituciones de salvamento, como parte de una herramienta de apoyo a los sistemas de oceanografía operacional.

3.3.1. Modelo de LAMTec

Uno de los proyectos en los que se ha colaborado durante el desarrollo de la tesis, ha sido el proyecto PREVIMAR (Previsión de Circulación del Espacio Marino Macaronésico) de la convocatoria INTERREG III-B (2003-2005). Como objetivo del proyecto se establecieron las bases operacionales necesarias, para establecer un sistema de previsión de la circulación oceánica para toda la región de la Macaronesia. Los socios de Laboratorio de Ambiente Marino y Tecnología (LAMTec) perteneciente a la Universidad de las Azores, desarrollaron un modelo de predicción de trayectorias para toda el área de la Macaronesia. El modelo desarrollado consiste en un modelo de transporte que predice la trayectoria que va a seguir un objeto, que está sujeto a unas determinadas condiciones que necesitaremos conocer de antemano que son el oleaje, el viento y la corriente. A continuación se pasa a describir la obtención de los datos que son utilizados para las predicciones del modelo de LAMTec. (Alves et al., 1994; Juliano et al., 2006).

.- Los datos de viento usados en el modelo provienen de dos fuentes diferentes, por un lado se dispone de datos de viento en tiempo real obtenidos mediante satélite por el dispersómetro QuickScat y por otro lado, se ha dispuesto de la previsión de datos de viento llevada a cabo por el *National Centre for Environmental Prediction* (NCEP).

.- Los datos de las corrientes usados para alimentar el modelo de transporte han sido calculados en base a datos altimétricos e hidrológicos (Juliano, 2003). A partir de la utilización de estos datos ha sido posible la reconstrucción de la circulación oceánica de la superficie, para un período de cerca de 13 años (1992-2005), para todo el Océano Atlántico (Juliano y Alves, 2007). La reconstrucción de la circulación oceánica de la superficie es obtenida a través de la utilización de la anomalía del nivel del mar (SLA) en relación al geoide (obtenidos a través de AVISO), en conjunto con el campo de altura dinámica media (MDT) obtenida con datos hidrológicos históricos para un período de 60 años. La resolución espacial utilizada fue de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (latitud x longitud). La resolución temporal fue de 10 días, coincidiendo con la duración de los ciclos de los satélites. Los datos de SLA fueron interpolados para una malla espacial previamente definida. Una vez obtenidos los campos regularmente interpolados es posible obtener el campo de la velocidad geostrofica y altura dinámica absoluta (ADT) en la superficie para los períodos temporales y para las regiones oceánicas analizadas.

Utilizando las series temporales de 10 días, fue posible obtener mediante la interpolación lineal en el tiempo, cartas diarias de las corrientes geostróficas de la superficie.

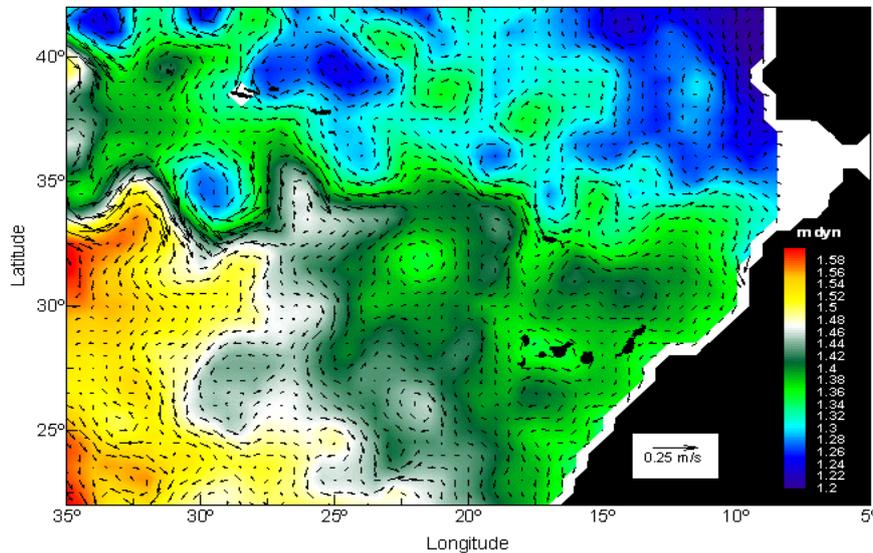


Figura 3.20. Altura dinámica absoluta (color) y corriente geostrófica (vector) de la superficie (Juliano, 2003).

.- Los datos de oleaje que se introducen en el modelo se obtienen mediante el modelo WAVEWATCH III, este es un modelo de gran escala para la evolución del estado del mar (agitación marítima, oleaje). El modelo se inicia con datos de la topografía de la zona, de viento, corrientes y el nivel del mar. Las salidas del modelo pueden ser usadas para la inicialización y forzamiento de modelos de dominios más pequeños o de menor escala. Recurriendo a los datos históricos de viento (40 años de datos), se utilizó el modelo WAVEWATCH III para simular el estado del mar en el Atlántico Norte entre 1960 y 1999. Estas simulaciones fueron esenciales para la calibración del modelo, pues permiten la comparación entre los resultados obtenidos y la realidad observada. Las bases de datos utilizadas fueron ETOPO5 (*ETOPO5-Digital Relief of the Surface of the Earth*) y datos históricos de viento de la NOAA. Los resultados de este modelo se acoplan al modelo de transporte lo que permite, en función del estado del mar, predecir la trayectoria de objetos a la deriva así como posibles derrames de hidrocarburos.

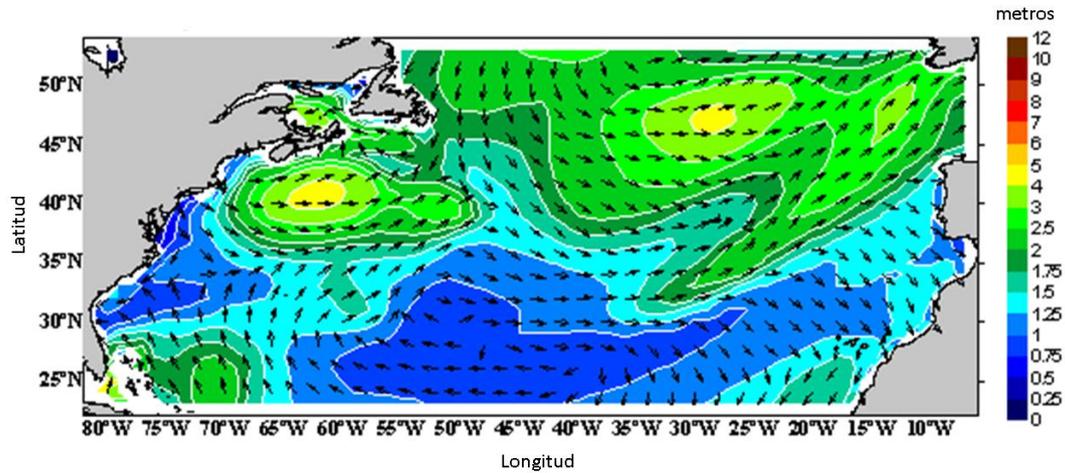


Figura 3.21. Resultados del modelo WAVEWATCH III para una simulación realizada para todo el Atlántico, donde se observa la altura dinámica en metros (color) y la dirección de propagación del oleaje (vector). www.lamtec-id.com

Una vez recopilada la serie de datos de viento, corrientes y oleaje, estos datos son introducidos en el modelo de transporte. Como resultado se obtiene la predicción de la trayectoria para un objeto que se encuentra a la deriva, partiendo de un punto de origen (definido como punto del incidente). Los coeficientes de arrastre del viento y de la corriente deben ser establecidos en función de cada tipo de objeto y pueden ser modificados en cada caso. El modelo está desarrollado en código FORTRAM, utiliza la ecuación de la hidrodinámica y mediante un proceso de interpolación en el tiempo y el espacio se obtiene la trayectoria más probable aplicando un filtro de Markov's (Alves et al., 1994; Juliano et al., 2006).

Este modelo de predicción, desarrollado por LAMTEC, ha estado disponible en los casos de ejercicios prácticos con instituciones de salvamento, algunos de sus resultados se presentan en el correspondiente apartado de aplicaciones (ver 6.1.2 y 6.1.3).

Para el periodo comprendido entre los años 2003 y 2005 los datos de las boyas de deriva desplegadas durante ese periodo, fueron usados para comparar los resultados obtenidos por el modelo para el área de Canarias, lo que ha permitido evaluar su grado de acierto. En el apartado de resultados (ver 5.5.1) se presentan algunos ejemplos del estudio comparativo.

3.3.2. Modelo MyOcean

MyOcean es un proyecto europeo FP7, en el que están involucrados 29 países y 61 instituciones, centrado en la implementación de la iniciativa europea GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*) para el asentamiento e integración de los servicios de observación y predicción oceánica en los mares y cuencas europeas.

MyOcean pretende contribuir a la generación de productos oceánicos de interés, con el fin de desarrollar e implementar los sistemas operacionales necesarios para prestar un servicio que ofrece predicciones de corrientes, salinidad, temperatura y nivel del mar, entre otros. Puertos del Estado junto con MERCATOR son responsables del desarrollo y funcionamiento que da cobertura a la zona denominada *IBI* que comprende la región de Iberia, Bizkaia, Irlanda (Figura 3.22). La información producida en el seno de MyOcean permite describir el estado físico del océano a través de análisis retrospectivos (*hindcast*) y predicciones (*forecast*). García-Sotillo, 2012.

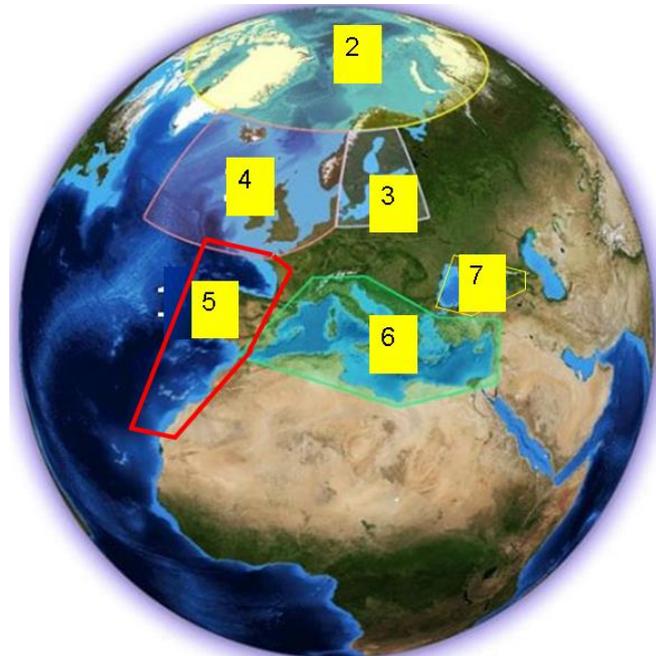


Figura 3.22. Mapa global de la cobertura que ofrece el modelo MyOcean. Los números indican los submodelos por regiones. Nuestra zona de estudio es encuentra en el submodelo 5, denominado zona IBI (Iberia, Bizkaia, Irlanda).

El sistema de predicción está basado en una aplicación del modelo numérico de predicción oceánica NEMO v3.2 (*Nucleus for European Modelling of the Ocean*). Es un modelo baroclínico de tres dimensiones, que resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes en coordenadas geopotenciales. Esta aplicación regional se anida en el modelo global MyOcean empleando forzamientos atmosféricos procedentes de la predicción del ECMWF (*European Centre for Medium-range Weather Forecast*). El modelo NEMO está en código FROTRAM v90 y contiene 71.200 líneas de código. La estructura de MyOcean incluye varios procedimientos como son la adquisición de los datos, el preproceso, almacenaje, calibración/validación y los servicios al usuario mediante los cuales se ofrece un servicio de predicción oceanográfico robusto. El sistema de datos incluye unas 150 estaciones fijas entre boyas y mareógrafos, así como todos los drifters y perfiladores que pasan por la zona.

Los procesos de calibración/validación incluyen las técnicas más actuales de verificación y consistencia, permitiendo validar los productos de la zona IBI en diferentes escalas temporales y dominios espaciales por medio del análisis de diferentes parámetros (SST, SSH, color, corrientes, salinidad superficial, etc.). Estas comparaciones se hacen tanto con observaciones (fuentes in-situ y teledetección) como con salidas de otros modelos (globales y/o regionales) distribuidos en tiempo real. En MyOcean se realizan predicciones de las corrientes en un horizonte de predicción de 72 horas. Se pueden obtener predicciones de las variables zonal y meridional de la corriente con resolución horaria (para un solo nivel superficial) y resolución diaria (para varios niveles de profundidad).

Las predicciones del modelo MyOcean han sido usadas en casos de ejercicios prácticos y algunos de los resultados se presentan en el correspondiente apartado de aplicaciones (ver 6.1.2).

En colaboración con Puertos del Estado en el año 2011, durante una estancia predoctoral en el Departamento de Área del Medio Físico, se realizó un estudio comparativo de los datos de predicción de corrientes obtenidos del modelo de MyOcean, con los datos de las boyas de deriva. El periodo seleccionado para realizar los estudios comparativos fue de abril a diciembre de 2011.

La metodología llevada a cabo para el estudio comparativo consistió en obtener de MyOcean los datos de la previsión de corrientes para el periodo de estudio y para la zona IBI (Iberia, Bizkaia, Irlanda), en las dos resoluciones que ofrece el modelo (horaria y diaria). Para ese periodo se obtuvieron los datos de todas las boyas de deriva que se encontraban en la zona. Mediante un programa en código FORTRAM para cada latitud y longitud de la boya de deriva se obtuvo, por el método del vecino más próximo, la coordenada zonal y meridional de la corriente obtenida por del modelo. Los datos de la trayectoria de la boya y la trayectoria “virtual” obtenida del modelo, fueron comparados en intensidad y dirección para las diferentes resoluciones que ofrece el modelo. En el apartado 5.5.2 de resultados se presentan algunos de los ejemplos estudiados.

4. ANÁLISIS DE LOS DATOS DE LAS BOYAS

4. ANÁLISIS DE LOS DATOS DE LAS BOYAS

A los datos registrados por las boyas de deriva se les ha realizado varios análisis, lo que nos ha permitido caracterizar la corriente y su variabilidad en torno a la región del Archipiélago Canario. Los diferentes análisis pasan a ser descritos en este apartado.

4.1. Estudio descriptivo

Las posiciones de las boyas dan información de su trayectoria, lo que nos permite conocer la corriente superficial en términos de la tendencia de la dirección de la trayectoria. Teniendo en cuenta que todas las boyas son lanzadas desde el mismo punto inicial ($29^{\circ}10'$ norte y $15^{\circ}30'$ oeste), ha sido posible estudiar la tendencia de la corriente en torno a ese punto de origen. Se han estudiado las trayectorias individuales de cada una de las boyas desplegadas y en base a los resultados, se ha podido establecer las principales rutas entre los canales de las islas.

Debido a que la Corriente de Canarias tiene una dirección predominante hacia el suroeste, a su paso por el archipiélago las islas van a actuar como obstáculo al paso del flujo, observándose determinadas zonas de la costa donde las boyas de deriva impactan de un modo concurrente. Se han identificado estas zonas y se han considerado potencialmente sensibles, en el caso de producirse algún accidente marítimo al norte del archipiélago. Del mismo modo las trayectorias de algunas de las boyas se han quedado retenidas en estructuras mesoescalares de tipo remolino, tanto ciclónicos como anticiclónicos. Se ha identificado la zona de formación de estas estructuras, además de sus escalas espacio-temporales. Estos fenómenos son importantes a la hora de caracterizar la corriente en esta zona, debido a que son fenómenos recurrentes y de larga duración.

4.2. Análisis temporal

La velocidad es sin duda la principal componente a tener en consideración para el estudio de las corrientes oceánicas, con esta variable podemos caracterizar el tipo de flujo. Se han realizado estadísticas mensuales y anuales de la velocidad para la serie de datos de 15 años de observaciones, obteniéndose los valores máximos, mínimos, el valor medio y desviación estándar. Los resultados se representan en forma de gráficos y tablas en el correspondiente apartado de resultados 5.2.

Respecto a la distribución del número de observaciones en función del tiempo, destacamos que no se observa sesgo significativo estacional. El número de observaciones por mes está en torno 7.000 observaciones y la diferencia entre el mes con más observaciones (diciembre con 8.304 observaciones) y el mes con menos observaciones (septiembre con 6.471 observaciones) está entorno al 22%.



Figura 4.1. Gráfica de la distribución del número de observaciones por meses.

No sucede lo mismo con el número de observaciones por año, en este caso si se observa un sesgo significativo. El año con menos observaciones (el 2012 con 3.672 observaciones) difiere con respecto al año con más observaciones (el 2001 con 27.283 observaciones) en un 86%. Esto habrá que tenerlo en consideración a la hora de interpretar los resultados estadísticos.

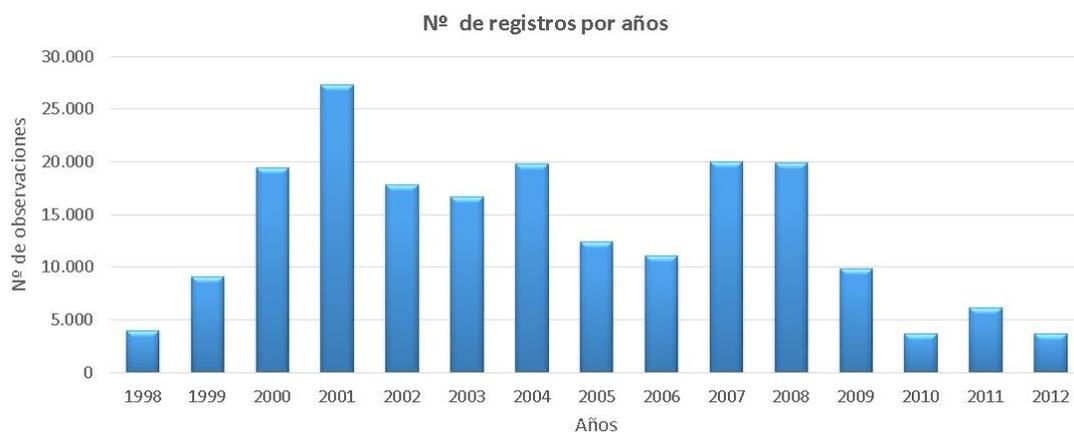


Figura 4.2. Gráfica de la distribución del número de observaciones por año.

4.3. Análisis espacial

Nuestra zona de estudio va a estar delimitada en torno al Archipiélago Canario entre 24° -30° norte y 21°- 12° oeste. Se ha definido un área que cubra la zona de actuación por parte de las instituciones de salvamento y con la suficiente resolución para obtener resultados relevantes. El objetivo es que los datos obtenidos puedan servir de apoyo a la sociedad civil y a las instituciones que lo requieran en caso necesario.

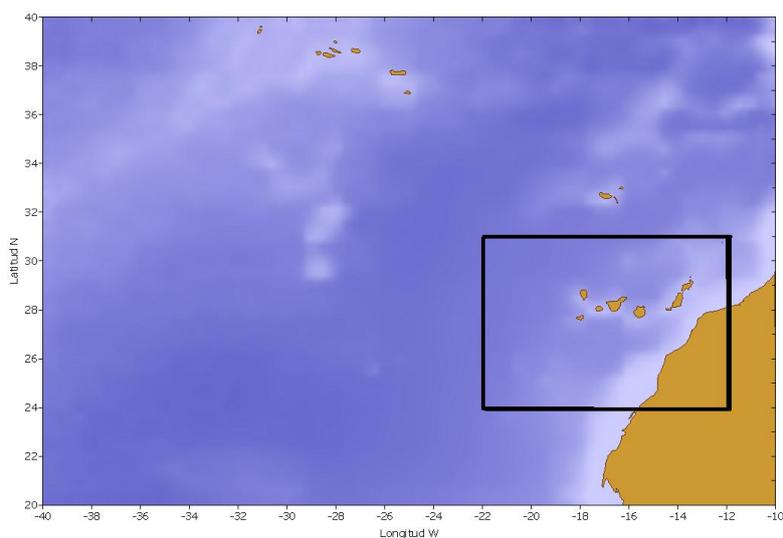


Figura 4.3. Delimitación de la zona de estudio en torno al Archipiélago Canario.

Hay dos maneras de describir el flujo de un fluido (Pickard, 1968) el método euleriano (determina el campo de velocidad de un fluido en un punto fijo en función del tiempo) y el método lagrangiano (determina las características de una parcela de fluido en movimiento en función del tiempo). Los datos de las boyas de deriva son clasificados como datos lagrangianos, el problema que presenta este tipo de mediciones, es la imposibilidad de muestrear de manera homogénea un espacio donde se dan diferentes regímenes de velocidad. Los procesos de advección y divergencia de se suceden en la capa superficial del océano, hacen que los datos de las boyas de deriva no están uniformemente distribuidos, ni en el espacio ni en el tiempo. Para homogeneizar dichas medidas se van a hacer mapas pseudo-eulerianos a partir de las medidas lagrangianas de las boyas. Ya que las medidas eulerianas permiten una clara separación entre el espacio y el tiempo, permitiendo un uso más directo y sencillo de los datos.

Para ello se tomará como base los estudios llevados a cabo por Fratantoni (2001) y por otros autores (Lumpkin, 2003; Lumpkin y Garzoli, 2005; Lumpkin y Garraffo, 2005), que han hecho uso de las boyas de deriva para caracterizar la corriente en una determinada región. Se establece la distribución de la zona en cuadrículas, la longitud de éstas será definida en función de la escala de los procesos que queramos estudiar y del número de observaciones disponibles. En este trabajo, en base al número de observaciones, la zona de estudio se ha dividido en cuadrículas de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$.

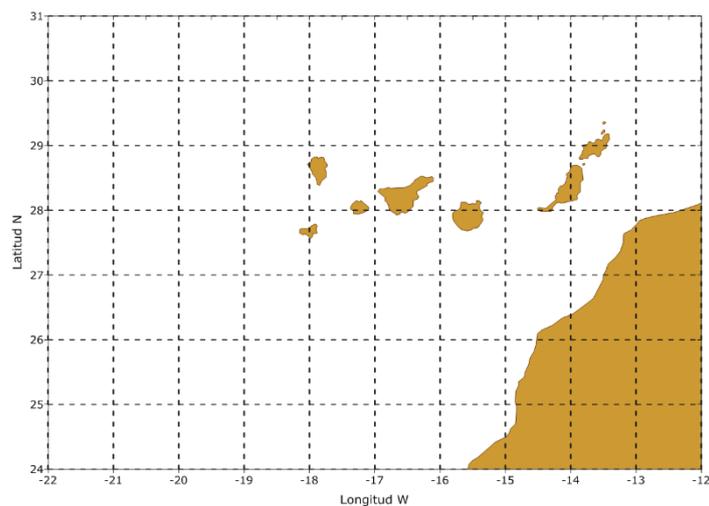


Figura 4.4. Delimitación de la zona de estudio dividida en cuadrículas de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$.

Cálculo del flujo medio de la corriente

El movimiento de las boyas de deriva en la capa superficial del océano es un proceso complejo de describir, debido a la interacción de fenómenos de diferentes escalas de movimiento. Se suelen hacer algunas consideraciones que permiten hacer uso de las ecuaciones simplificadas del movimiento. La consideración más usada es que el campo de velocidad tiene dos componentes distintas, con escalas de movimiento separables: un flujo medio \hat{u} , caracterizado por largas escalas espaciales y un flujo medio turbulento de mesoescala u' . Por lo que el movimiento de las boyas de deriva viene dado por la advección del flujo medio \hat{u} y el transporte turbulento difusivo debido a u' (Taylor, 1921). Esta separación de escalas permite resolver la ecuación de advección- difusión para los valores medios:

$$U = \hat{u} + u' \quad (\text{ec. 4.1})$$

Tras dividir la zona de estudio en cuadrículas de $1^\circ \times 1^\circ$ y asumiendo que el flujo dentro de cada cuadrícula es homogéneo y estacionario, el cálculo de la componente media es calculado como la velocidad media de todas las observaciones contenidas dentro de cada cuadrícula. Del mismo modo, el desvío del flujo medio es calculado mediante la desviación estándar de la velocidad. Los cálculos del flujo medio para la zona de estudio, se van a realizar para la serie completa (1998-2012), así como por estaciones. Los correspondientes mapas obtenidos de estos cálculos se presentan en el apartado 5.3 de resultados.

Como complemento al estudio del flujo medio de la corriente, se ha tomado la serie completa de boyas de deriva del Programa Global de Drifters de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). Esta serie de datos incluye todas las boyas de deriva desplegadas por otras instituciones y que se encuentran dentro de nuestra área de estudio. El objetivo es aumentar el número de registros para mejorar la estadística de los resultados, ya que el número de observaciones en algunas de las regiones no resultó ser suficiente. Teniendo en cuenta este aumento en la serie de datos, los mapas del flujo medio de la corriente obtenidos del Programa Global de Drifters tienen una resolución de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$.

La metodología para el cálculo del flujo medio llevada a cabo por Lumpkin y Johnson (2013) para la serie de datos del Programa Global de Drifters, se pasa a describir a continuación. La serie de datos es interpolada cada 6 horas según la metodología descrita por Hansen y Poulain (1996). Como se ha comentado anteriormente, los datos de las boyas que han perdido la draga no son considerados para los estudios de la corriente media, por lo que estos son extraídos de la serie. Los datos de latitud, longitud así como las componentes longitudinal y latitudinal de la velocidad son promediados cada 5 días. Al promediar cada 5 días, las fluctuaciones debido a los fenómenos de alta frecuencia como son las mareas y ondas inerciales son quitados, obteniéndose las bajas frecuencias que forman parte de los cambios medios estacionales e interanuales. Por último los registros se separan en cuadrículas de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ y se les calcula los promedios de la velocidad.

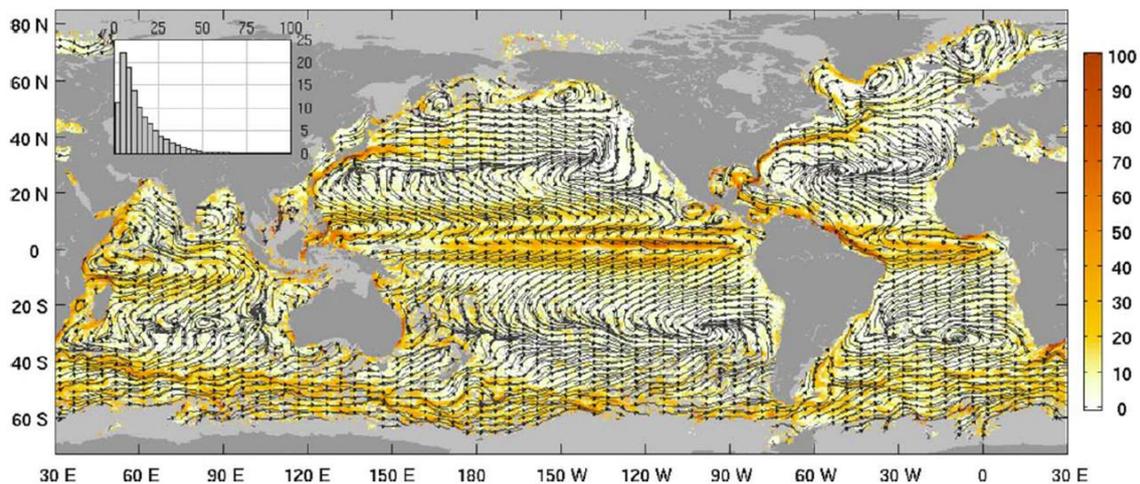


Figura 4.5. Velocidad de la corriente media (color en cm/s) y líneas de corriente (líneas negras), obtenidas de los datos de las boyas de deriva para todo el océano. En el recuadro superior de la izquierda se muestra el histograma de la corriente media (eje horizontal en cm/s de 0 a 100).

Lumpkin y Johnson, 2013.

4.4. Análisis espectral

La función de autocorrelación $r(k)$ es útil para determinar el grado de dependencia que está presente en los valores de una serie. Si el proceso es aleatorio $r(k)$ fluctúa alrededor de cero y cada dato es independiente del anterior, el proceso no tiene memoria del pasado. Para procesos periódicos la función $r(k)$ es también periódica, existiendo una fuerte relación entre los valores. La función de autocorrelación permite realizar un análisis de los datos en el dominio temporal, pero cuando existen periodicidades claras, es mejor el análisis en el dominio de frecuencias, mediante el estudio de la densidad espectral.

$$r(k) = \frac{Cov(k)}{Cov(1)} \quad (ec. 4.2)$$

$$Cov(k) = \frac{1}{N-k+1} \sum_{i=1}^{N-k+1} (x_i - \bar{x})(x_{i+k-1} - \bar{x}) \quad (ec. 4.3) \quad \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (ec. 4.4)$$

El análisis espectral es una técnica que permite el estudio de las frecuencias de una serie mediante la representación de la serie en el dominio de frecuencia. Es decir se trata de descomponer la serie en diferentes bandas de frecuencia y estimar la importancia relativa de cada una de estas frecuencias así como su contribución a la variación total de la serie. El análisis espectral permite obtener una descripción de la variabilidad oceánica asociada a la dinámica de la región de estudio.

La Transformada de *Wavelet* (transformada onda) es una herramienta matemática relativamente nueva que se utiliza para filtrar series temporales de datos y analizar la variación de su contenido espectral, ofreciendo una representación tiempo-frecuencia más precisa que el análisis tradicional de Fourier. Mediante este análisis no sólo se obtienen las frecuencias principales, sino que además indica cuándo ocurren y cuál es su duración. Este análisis en tiempo-frecuencia permite detectar cambios tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia simultáneamente. Representando la evolución temporal del espectro de la señal se puede localizar en el tiempo la ocurrencia de discontinuidades, impulsos y variaciones que escapan de los métodos habituales de análisis.

Mientras que el análisis de Fourier consiste en descomponer una señal en funciones de senos de varias frecuencias, el análisis de *wavelets* consiste en descomponer una señal en versiones escaladas móviles de una *wavelet* original (denominada función “madre”). Una vez definida la función y su relación frecuencia-escala se representa el espectrograma (que representa la energía del contenido frecuencial de la señal según va variando ésta a lo largo del tiempo). Examinando en el espectrograma la posición de los máximos, se puede localizar el instante en el que ocurren y utilizarlos para distinguir y clasificar eventos.

Hay dos tipos de transformadas de wavelet. La transformada discreta (DWT) que actúa sobre la señal con filtros de paso-bajo y paso-alto, separando las contribuciones de alta y baja frecuencia de la señal. Y la transformada continua (CWT) que actúa como un filtro de pase-banda, dejando solo las componentes de frecuencias deseadas. En este estudio vamos a trabajar con la transformada continua, la cual descompone la serie en el dominio tiempo-escala o tiempo-frecuencia y permite la identificación de cambios temporales de las frecuencias dominantes de la señal, similar a un espectro de Fourier pero en cada instante de tiempo (Percival y Walden, 2000):

La transformada continua de *wavelet* (CWT) se define como:

$$CWT_x(n, s) = \frac{1}{\sqrt{s}} \sum_{n'=0}^{N-1} x_{n'} \Psi^* \left(\frac{n'-n}{s} \Delta t \right) \quad n = 0 \dots N-1 \quad (ec. 4.5)$$

En este trabajo se ha realizado un análisis *wavelet* para detectar patrones de velocidad en las trayectorias. De todas las boyas desplegadas se seleccionaron 52 boyas para realizar el análisis *wavelet*, solo se consideraron las boyas que tenían un registro de datos superior a un año. Para todas las boyas analizadas se obtuvieron sus correspondientes espectrogramas, que posteriormente fueron analizados para identificar diferentes patrones de comportamiento.

5. RESULTADOS

5. RESULTADOS

En este apartado se van a presentar los resultados de las boyas de deriva desplegadas durante 15 años, comprendidos entre 1998 y 2012. En la Figura 5.1 se representan las trayectorias de todas las boyas desde su lanzamiento, en la Estación Europea de Series Temporales Oceánicas de Canarias (ESTOC), hasta la finalización de su trayectoria. Algunas de las boyas llegaron a las costas Americanas (un 6%) recorriendo más de 6.000 kilómetros a través del Océano Atlántico. La máxima distancia recorrida fue de 7.950 kilómetros por la boya con el identificador 71095, lanzada en la estación ESTOC el 12 de noviembre de 2009 y que recorrió esa distancia durante 21 meses, hasta que impactó en la costa de Florida. Destacamos que tanto la boya 71095 como el resto de las boyas que alcanzaron las costas Americanas, habían perdido la draga en algún momento de su trayectoria. El rango en latitud alcanzado por las boyas ha sido de 38° a 8° norte y con respecto a la componente longitudinal ha sido de 88° a 9° oeste.

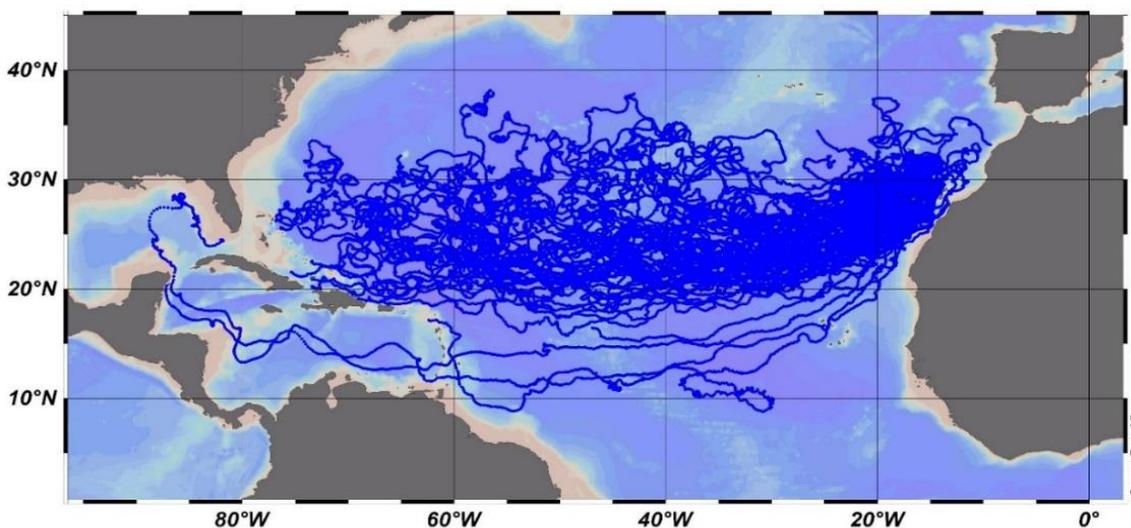


Figura 5.1. Trayectorias de las 130 boyas de deriva desplegadas durante el periodo 1998-2012.

En la Figura 5.2 se representan las trayectorias de todas las boyas durante el tiempo que tienen la draga operativa. Esas trayectorias se corresponden con los registros de datos que han sido seleccionados para el estudio de la corriente superficial (ver 3.1.1), el resto han sido excluidos. En este caso el rango en latitud alcanzado por las boyas ha sido de 37 a 19° norte y en longitud de 51° oeste a 9° oeste.

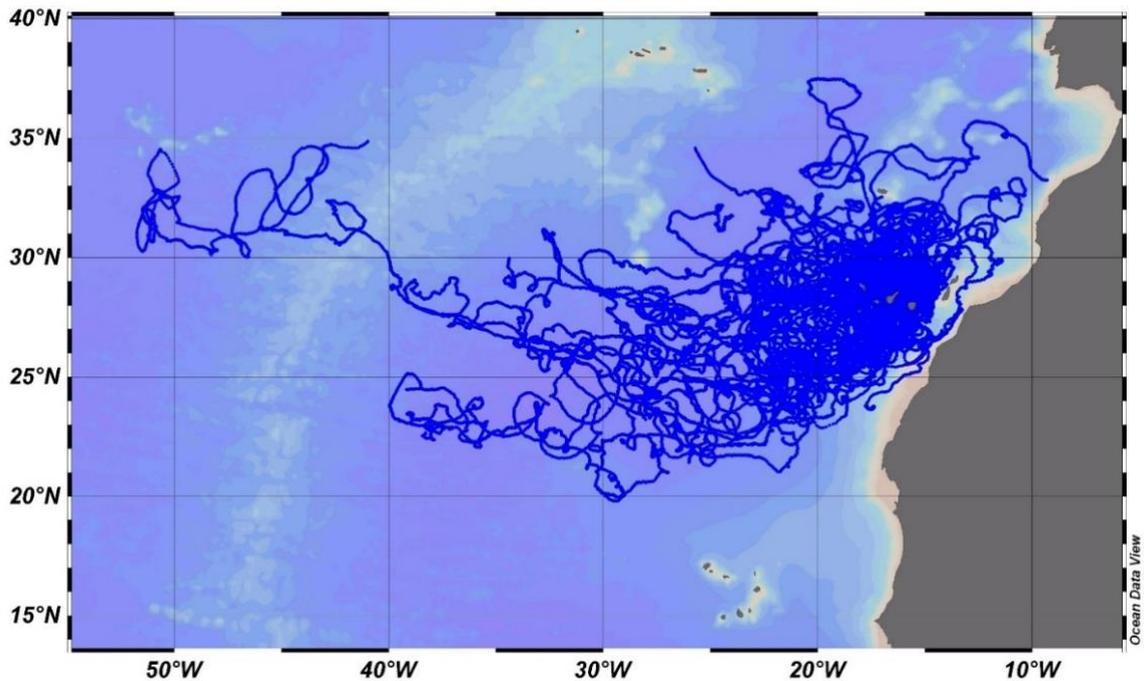


Figura 5.2. Trayectorias de las boyas con la draga operativa durante el periodo 1998-2012.

Como se comentó en el capítulo de material y métodos, las boyas de deriva llevan instalado un sensor de temperatura que permite medir la temperatura superficial del mar durante toda la trayectoria de las boyas. Los datos de temperatura no son estudiados en detalle en este trabajo, pero si han estado disponibles para otros estudios. Como ha sido la calibración de imágenes de satélite, o la calibración de medidas de temperatura superficial del mar, tomadas por otros instrumentos en campañas oceanográficas en la zona. En las dos figuras que se muestran a continuación (Figura 5.3 y Figura 5.4) se puede ver la temperatura superficial de la mar medida por las boyas de deriva durante su trayectoria.

La Figura 5.3 corresponde con la trayectoria completa de las boyas de deriva para todo el Atlántico, donde se observa como aumenta la temperatura hacia el oeste a partir de la longitud 30° oeste donde se alcanzan los 25°C, alcanzando las máximas temperaturas cerca del Mar de Caribe con temperaturas superiores a 27°C.

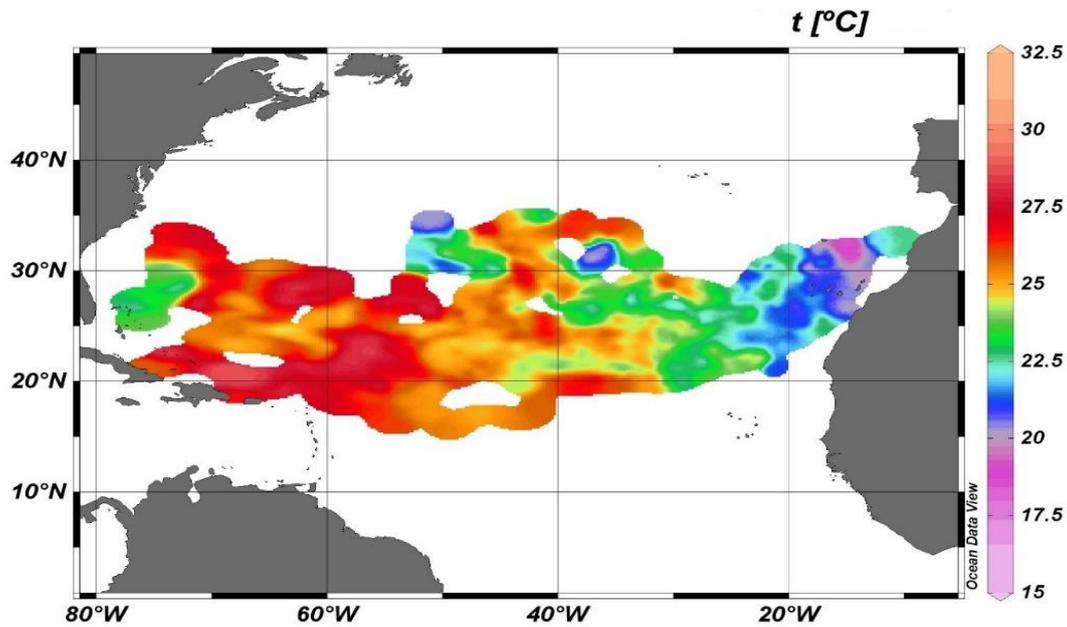


Figura 5.3. Temperatura superficial del mar para todo el Atlántico medido por las boyas de deriva.

La Figura 5.4 corresponde con la temperatura superficial del mar medido por todas las boyas de deriva a una menor escala, donde se observan las bajas temperaturas, inferiores a 20°C en torno a las islas, debido al efecto del afloramiento de la costa de África. Estas bajas temperaturas llegan a ser apreciables al norte del archipiélago y en las islas más orientales. Se observa un aumento de la temperatura hacia el oeste a partir de la longitud 20° oeste.

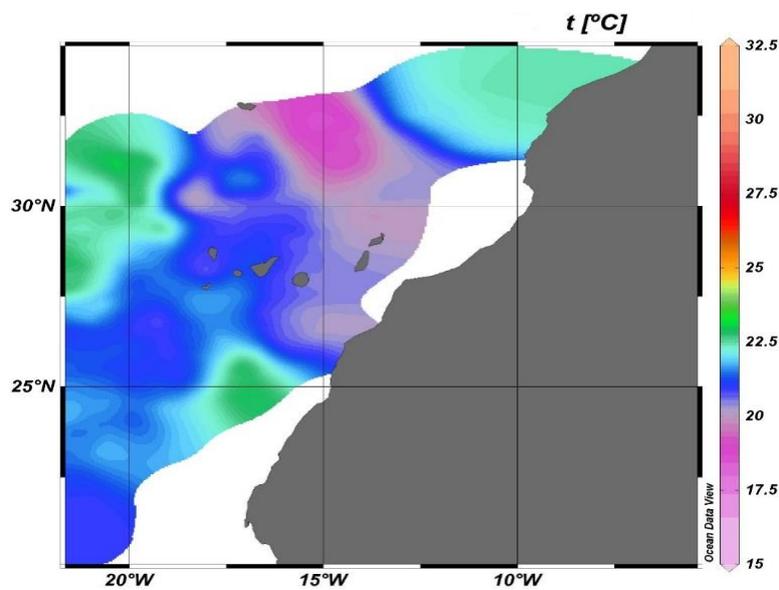


Figura 5.4. Temperatura superficial del mar medido por las boyas de deriva en el archipiélago Canario.

5.1. Descripción de las trayectorias

Mediante la representación gráfica de la trayectoria, podemos obtener la corriente en términos de la tendencia de la dirección de las trayectorias. A gran escala (varios meses-años) podemos ver como las boyas siguen el giro anticiclónico con una dirección predominante dirección suroeste. Pero a una menor escala (de semanas-meses) la variabilidad de la corriente es mucho mayor, encontrándose trayectorias en prácticamente todas las direcciones.

5.1.1. Principales rutas

Si consideramos la trayectoria inicial de las boyas en sus primeros días o semanas desde su lanzamiento y tomamos como punto de origen la estación de donde se despliegan todas las boyas ($29^{\circ}10'$ norte, $15^{\circ}30'$ oeste), podemos describir la tendencia de las corrientes en torno al punto de origen. A continuación se muestran las trayectorias de todas las boyas de deriva desplegadas desde su instante inicial (Figura 5.5). Se observa que hay trayectorias en prácticamente todas las direcciones, en el gráfico es muy difícil de interpretar la tendencia de la corriente si se observan todas las trayectorias en conjunto. Por ello, para el estudio de la tendencia seguida por las boyas en su trayectoria inicial, se han estudiado las trayectorias individuales de las boyas.

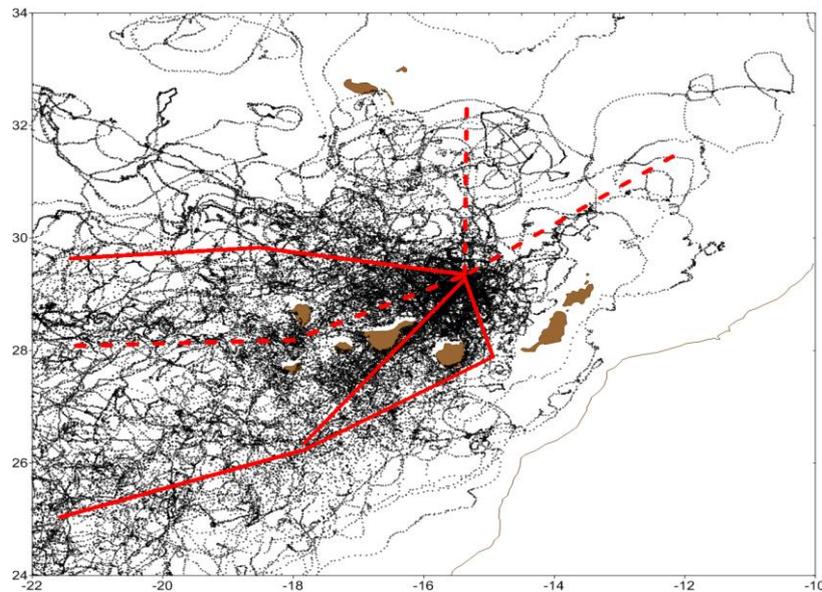


Figura 5.5. Trayectorias de todas las boyas de deriva desplegadas en la estación ESTOC. En rojo se marcan las principales rutas tomadas por las boyas. La línea continua marca las tres principales rutas y la línea discontinua marca las rutas secundarias.

La ruta inicial que más se repite es la dirigida en dirección suroeste entre el canal de las islas de Gran Canaria y Tenerife con un 36% de las boyas, seguida por la ruta sureste entre el canal de las islas de Gran Canaria y Fuerteventura en un 24%. La ruta oeste-suroeste entre el canal de la isla de Tenerife y La Palma es la cuarta ruta más repetida con un 11% de las boyas. Esta tendencia general hacia el suroeste pasando por las islas es coincidente con las descripciones clásicas de los estudios que se han hecho en la zona. Un 71% de las boyas en su trayectoria inicial siguen esta tendencia. Es menos conocida la tercera ruta más repetida, que es en dirección oeste sin pasar por las islas, registrada en un 16% de las boyas en su trayectoria inicial. También apreciamos una componente hacia el norte en un 8% de las boyas, llegando alguna a la latitud de Madeira e incluso hasta la latitud de las islas Azores. También se observa una tendencia inicial en un 5% de las boyas con dirección predominante hacia el Este, ésta se observa solo durante los meses que van de octubre a diciembre.

Destacamos la escasa presencia de datos entre la costa de África y las islas de Lanzarote y Fuerteventura, debido a que son muy pocas las boyas que pasan por el canal. Solo 3 boyas han pasado por el canal, coincidiendo todas en el periodo que va de octubre a enero. Una de las boyas que pasa por el canal es la boya identificada como 71092, lanzada en octubre del 2009 y que pasó por el canal con dirección norte paralela a la costa de África.

Con respecto a la intensa actividad de mesoescala, destacamos dos fenómenos concretos que han sido identificados por las trayectorias de las boyas y que se van a describir en los siguientes apartados, que son la presencia de remolinos y el número de boyas que impactan en las costas de las islas, debido al obstáculo que presentan éstas al paso del flujo.

5.1.2. Zonas de impacto

Queremos destacar un fenómeno que sucede de modo concurrente, que es el impacto de las boyas de deriva en las costas de las islas. Este hecho nos ha permitido identificar determinadas zonas de la costa que son más susceptibles en caso de producirse algún accidente marítimo. De las 130 boyas de deriva desplegadas 31 impactan en la costa de alguna de las islas. Estos impactos tienen lugar en las islas más occidentales, como son las islas de Gran Canaria (11 impactos), Tenerife (15 impactos), La Palma (3 impactos) y el Hierro (2 impactos).

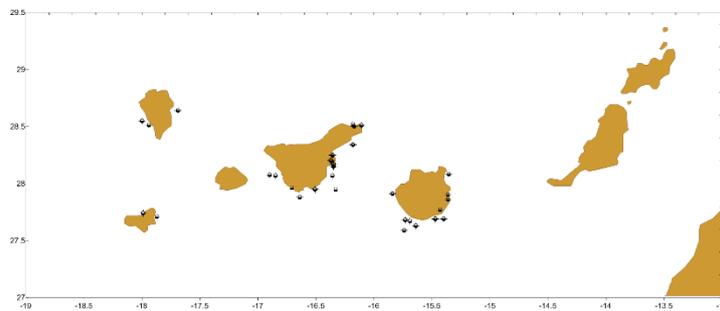


Figura 5.6 Identificación de las zonas de costa donde han impactado las boyas de deriva.

Los impactos al norte y noreste son consecuencia del obstáculo que presentan las islas al paso de la corriente hacia el suroeste. Por su parte los impactos que tienen lugar al sur y al oeste están asociados a los sistemas de corrientes que suceden entre los canales de las islas. En la siguiente figura se representan las trayectorias de dos boyas de deriva que impactan en la costa oeste de la isla de La Palma tras pasar por el canal entre Gran Canaria y Tenerife.

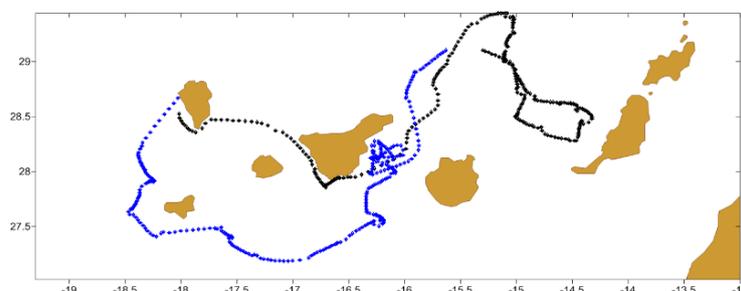


Figura 5.7. Trayectorias de dos boyas de deriva que impactan en la costa oeste de la isla de La Palma.

5.1.3. Presencia de remolinos

Las boyas de deriva, por sus características de diseño, son un buen instrumento para identificar y estudiar las estructuras mesoescalares de tipo remolino y aunque ese no es propósito de este trabajo, en este apartado se pasan a identificar esas estructuras como una característica de la Corriente de Canarias en torno al archipiélago. Algunas de las boyas se quedaron retenidas en estas estructuras llegando a desplazarse grandes distancias.

Los remolinos tienden a formarse al suroeste de las islas más occidentales pero también han sido observadas al norte de las islas. Han sido identificadas unas 25 estructuras de este tipo con escalas variables. El periodo de duración desde que se forman estas estructuras hasta que se disipan va desde pocos días hasta varios meses. El periodo de máxima duración identificado fue de 9 meses. La escala espacial también es variable y comprende desde pocos kilómetros hasta los 100 kilómetros de diámetro. En la siguiente figura se representa en un mapa la zona de aparición de estas estructuras mesoescalares, identificadas con una “A” en rojo, los remolinos anticiclónicos y con una “C” en azul, los remolinos ciclónicos. Las líneas discontinuas que se observan en el mapa indican la trayectoria seguida por algunos de los remolinos una vez formados y el vector indica la dirección en la que se desplazan.

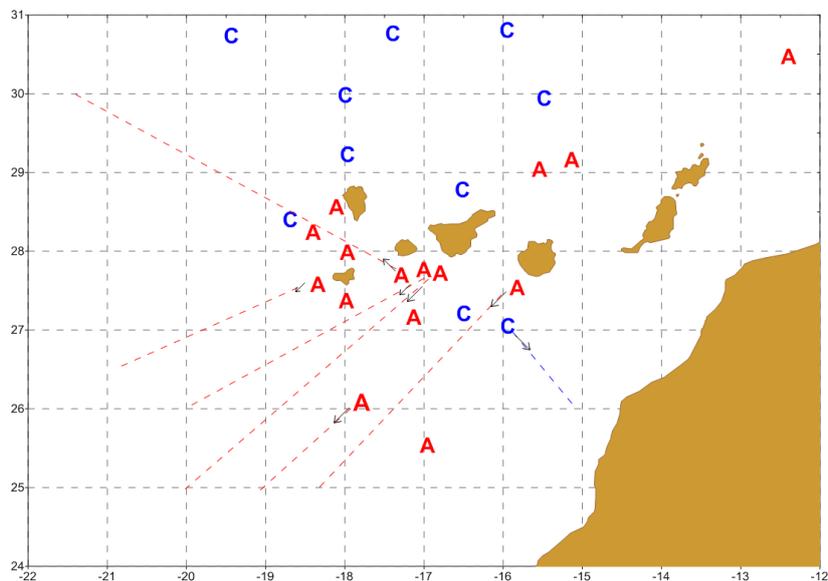


Figura 5.8. Identificación de remolinos ciclónicos (C) y anticiclónicos (A). El vector indica la dirección de desplazamiento y la línea discontinua la trayectoria seguida.

Observamos que los remolinos anticiclónicos son más abundantes que los ciclónicos. Destacamos que al norte de las islas predomina la formación de los remolinos ciclónicos frente a la presencia de los remolinos anticiclónicos, que son más abundantes al sur y suroeste de las islas. El periodo de aparición de estas estructuras es durante todo el año, pero con una mayor presencia durante el primer semestre del año.

Destacamos la concurrencia de formación de remolinos al oeste y suroeste de la isla de La Palma donde han sido identificados prácticamente durante todo el año. Esta zona ha sido estudiada por algunos investigadores debido a que es una zona de avistamiento de cetáceos y existe una relación de este tipo de estructuras con un aumento de la productividad como se comentó en el apartado de caracterización oceanográfica de la zona de estudio (ver 2.4). A continuación se muestra uno de los remolinos identificados al suroeste de La Palma. La boya 20334 desplegada el 27 de enero del 2000, se queda retenida en un remolino anticiclónico al suroeste de La Palma durante un mes (del 02/03/00 al 01/04/00). Durante ese periodo la boya registró sus máximas velocidades, alcanzando los 70 cm/s.

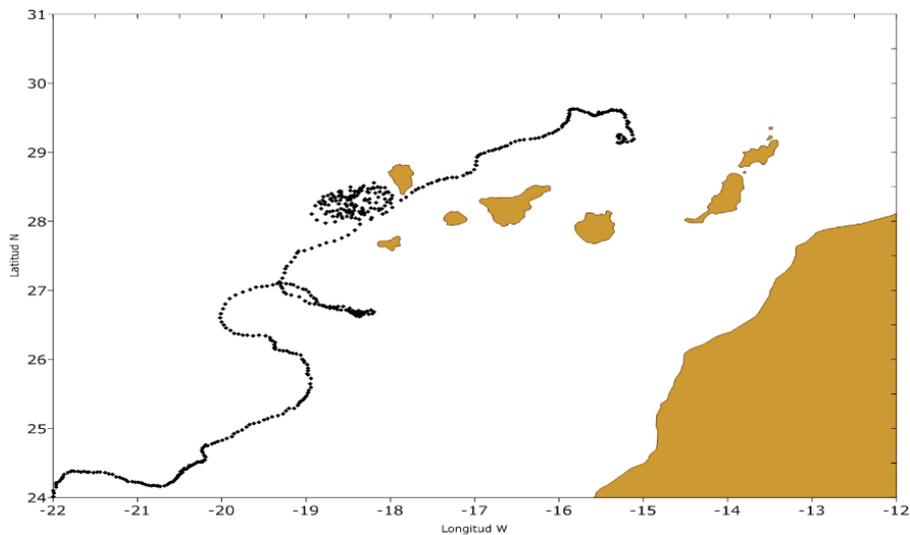


Figura 5.9. Trayectoria de la boya 20334, donde se observa la presencia de un remolino al suroeste de la isla de La Palma

A continuación se muestra el tramo de la trayectoria durante el periodo en el que la boya se encuentra en el remolino y el registro de la velocidad donde se observa un aumento coincidiendo con el instante que está en dicho remolino.

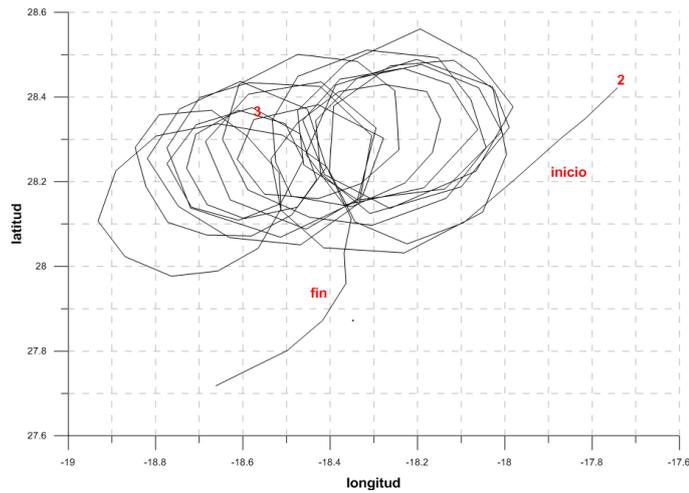


Figura 5.10. Tramo de la trayectoria de la boya 20334 durante el periodo (02/03/00 al 01/04/00). Los números indican el periodo en meses y se identifica el principio y fin del remolino.

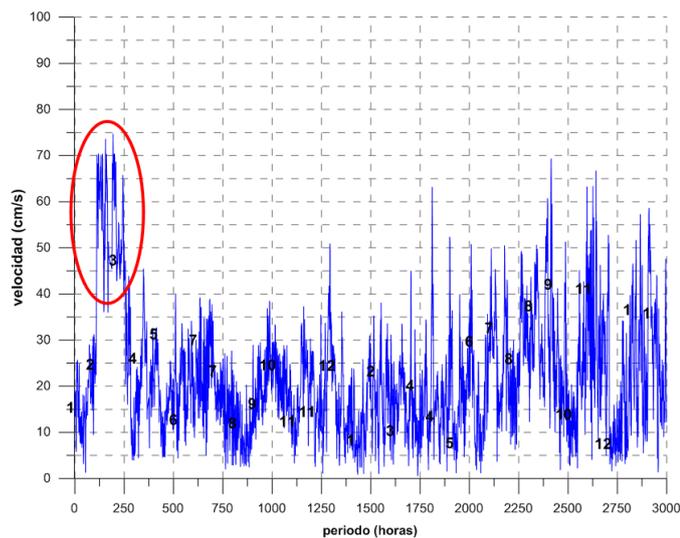


Figura 5.11. Velocidad registrada por la boya 20334. Los números indican los meses transcurridos. Se identifica en rojo el periodo en el que estuvo en un remolino anticiclónico.

El sur de las islas se ha identificado como una zona de formación de remolinos principalmente anticiclónicos. A continuación se muestra la trayectoria de la boya 20334 desplegada el 6 de abril del 2000, que queda retenida en un remolino anticiclónico al sur de La Gomera que posteriormente se desliza dirección noroeste.

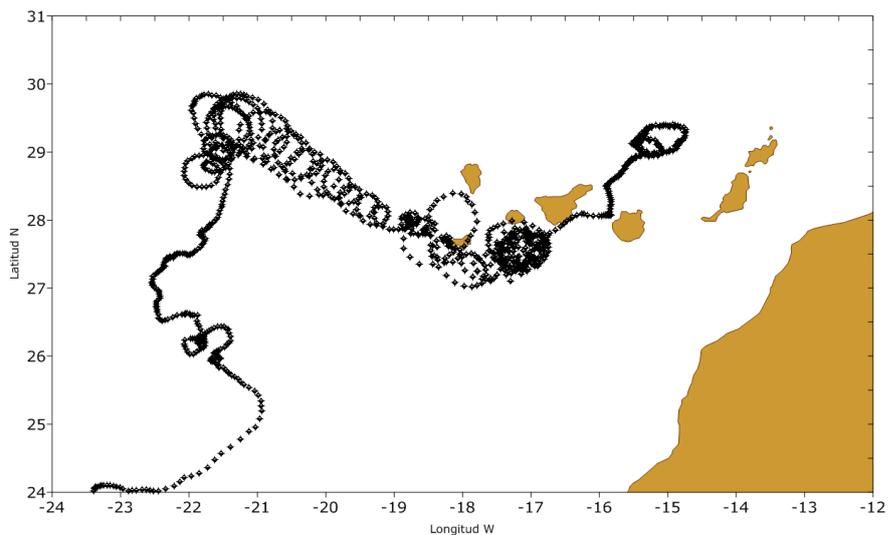


Figura 5.12. Trayectoria de la boya 20343. Se observa la presencia de un remolino al sur de la isla de La Gomera que posteriormente se desplaza dirección noroeste.

La boya se queda retenida en el remolino durante seis meses (del 29/05/2000 al 30/11/2000). Durante el mes de junio el remolino se encuentra al sur de la isla de La Gomera y es durante ese periodo cuando la boya registra sus máximas velocidades alcanzando los 77 cm/s. A continuación se muestra el tramo de la trayectoria durante el tiempo que la boya se encuentra en el remolino y el registro de la velocidad de la boya.

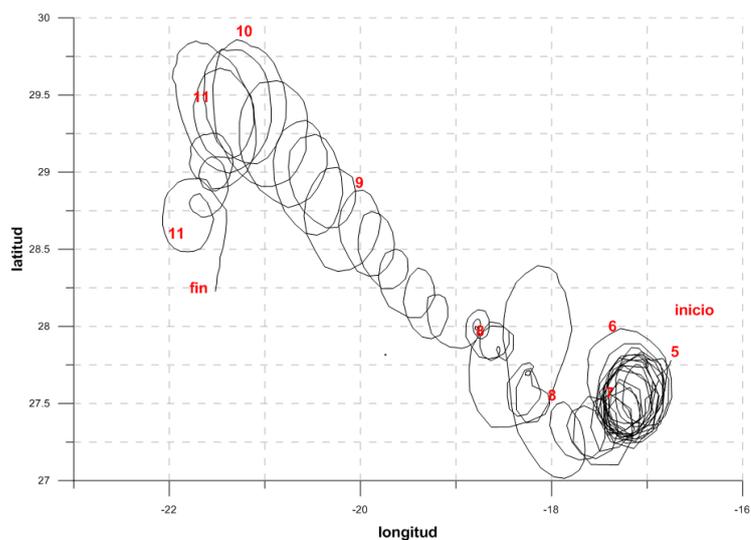


Figura 5.13. Tramo de la trayectoria de la boya 20343 durante el periodo (29/05/2000 al 30/11/2000). Los números indican el periodo en meses y se identifica el principio y fin del remolino.

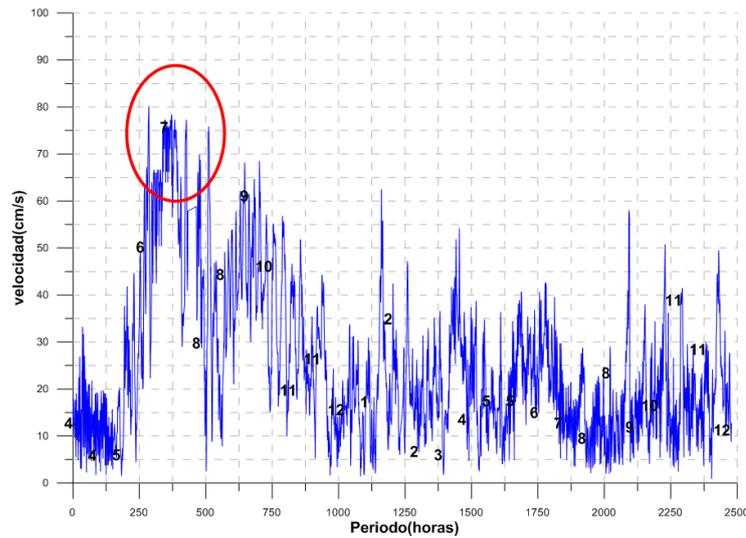


Figura 5.14. Velocidad registrada por la boya 20343. Los números indican los meses transcurridos. Se identifica en rojo, el periodo en el que estuvo en un remolino anticiclónico al sur de La Gomera.

Como se comentó en el correspondiente apartado de análisis de los datos (ver 4.4) a las boyas de deriva se le realizó un análisis espectral mediante la transformada de *wavelet*. El objetivo era detectar mediante esta metodología pautas de circulación en algunas de las trayectorias. El análisis se realizó a 52 de las boyas desplegadas, solo se analizaron las boyas con un registro de datos superior al año y medio. Para cada una de las boyas analizadas se obtuvo su espectrograma, que consiste en la representación gráfica de las variaciones de frecuencia e intensidad a lo largo del tiempo. Mediante los espectrogramas se puede localizar en el tiempo la ocurrencia de discontinuidades, impulsos y variaciones que se escapan de los métodos habituales de análisis. Para las boyas analizadas, los resultados determinaron patrones comunes en los casos en los que las boyas se encuentran retenidas en estructuras de tipo remolino, observándose un comportamiento en la escala tiempo-frecuencia similar. Para todos los casos en los que las boyas se encontraban con una estructura de tipo remolino, tanto ciclónico como anticiclónico, se observó un aumento en la frecuencia e intensidad de la velocidad. A continuación se presentan los resultados del análisis *wavelet* de la boya 20343 que acabamos de describir (Figura 5.12) que se queda retenida en un remolino anticiclónico durante seis meses.

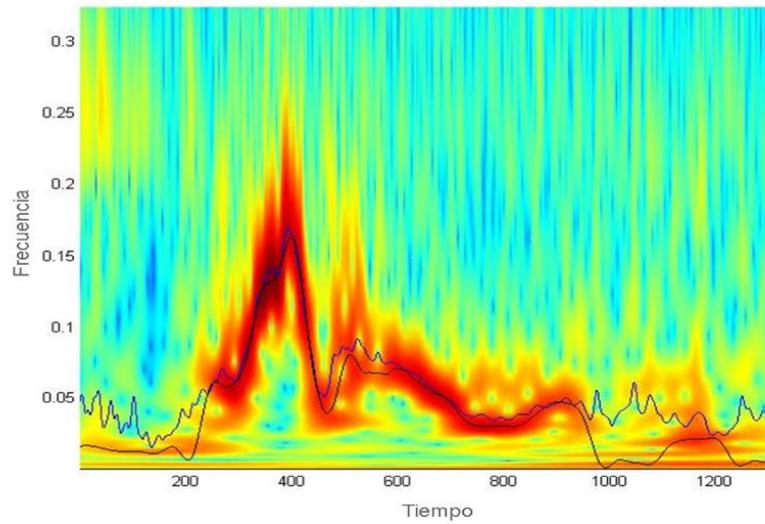


Figura 5.15. Espectrograma frecuencia - tiempo para la boya 20343

En el espectrograma se observa un aumento en la intensidad de la frecuencia para el periodo correspondiente entre el 29 de mayo y el 16 de junio del 2000 que coincide cuando la boya está en la estructura anticiclónica, seguido de una disminución al salir de la estructura. El periodo obtenido para esta estructura anticiclónica es de 5 días.

A continuación se muestran la componente zonal y meridional de la velocidad de la boya 20343, así como la intensidad de la velocidad, donde se aprecia el aumento en frecuencia e intensidad de la velocidad cuando la boya se queda retenida en la estructura anticiclónica anteriormente descrita.

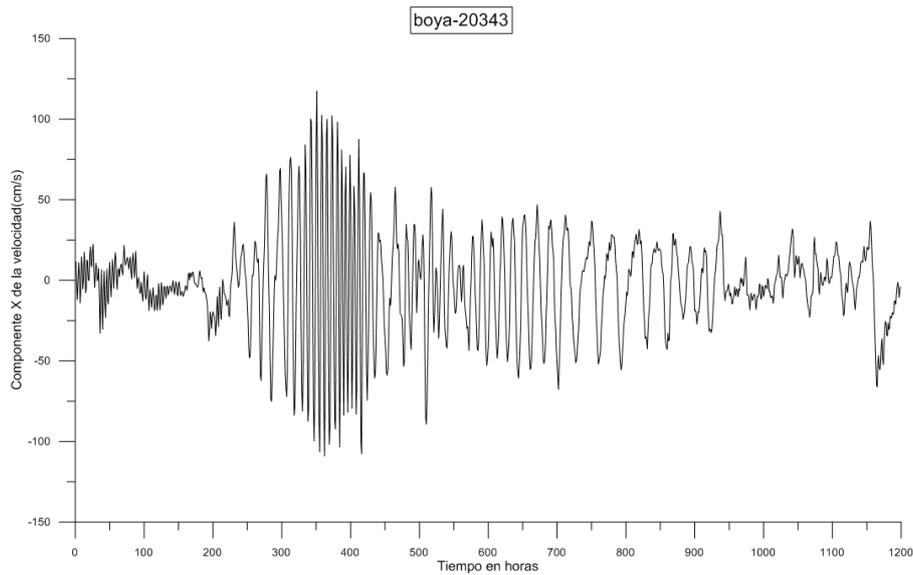


Figura 5.16. Componente zonal de la velocidad de la boya de deriva 20343

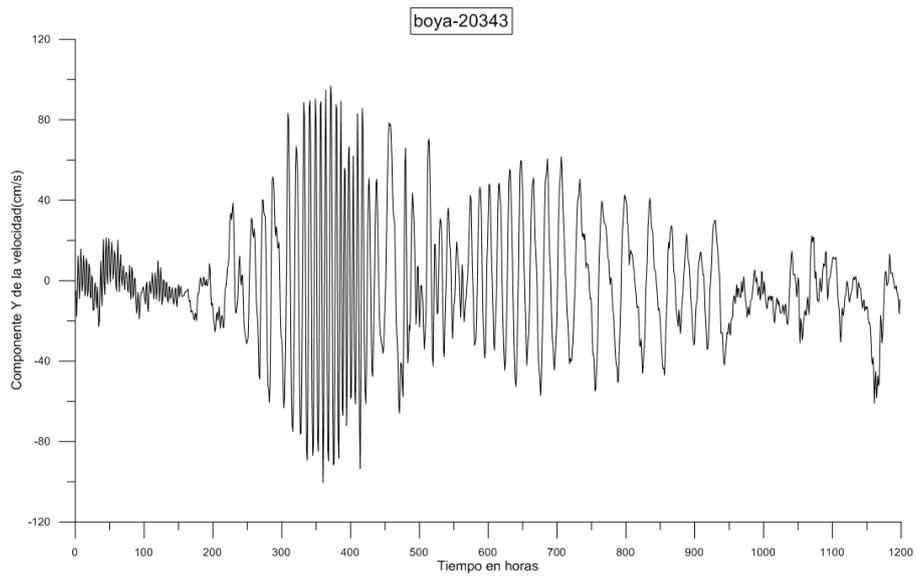


Figura 5.17. Componente meridional de la velocidad de la boya de deriva 20343

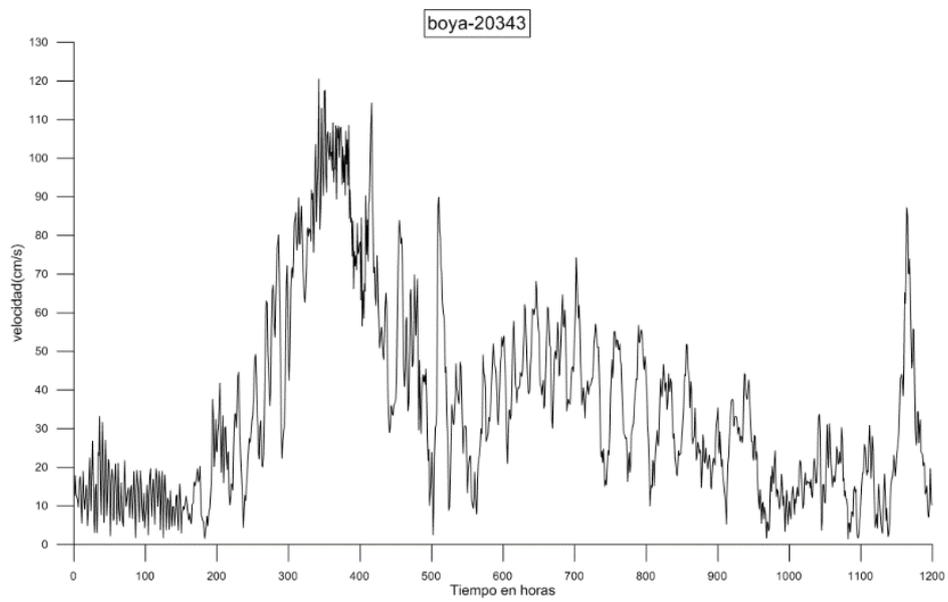


Figura 5.18. Intensidad de la velocidad de la boya 20343

A continuación se muestra el espectrograma obtenido de la boya 20334 tras el análisis *wavelet*, esta boya descrita al comienzo de este apartado (Figura 5.9), se encuentra con un remolino anticiclónico al oeste de la isla de La Palma. Del mismo modo que en el caso anterior, se observa un aumento en la intensidad de la frecuencia para el periodo correspondiente entre el 2 de marzo y el 1 de abril de 2000, que coincide cuando la boya está en una estructura anticiclónica (ver Figura 5.11) El periodo obtenido para esta estructura anticiclónica es de 6 días.

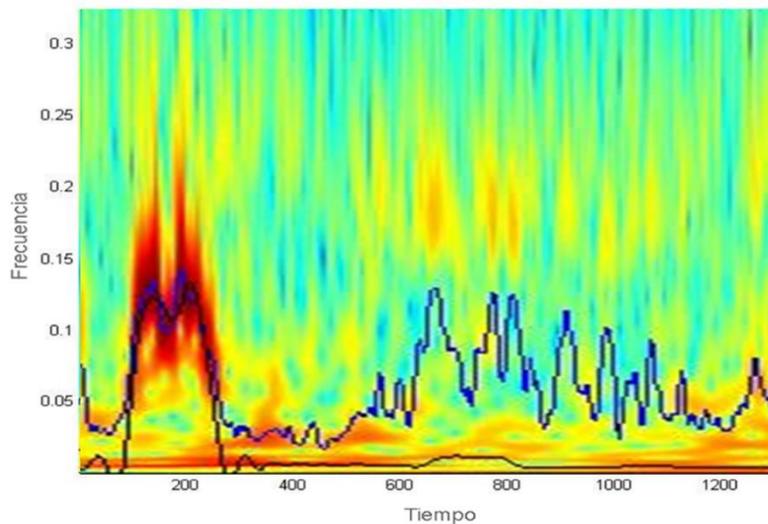


Figura 5.19. Espectrograma frecuencia - tiempo para la boya 20334

Los periodos identificados para las estructuras de tipo remolino estudiadas mediante el análisis *wavelet*, va desde los 2 días hasta los 6 días. Con los resultados obtenidos podemos determinar que esta técnica permite identificar estructuras oceanográficas de tipo remolino, mediante la identificación de sus propiedades en frecuencia y escala a partir de su espectrograma. Por lo que se puede considerar que el análisis *wavelet* puede llegar a ser una buena herramienta para la identificación de diferentes patrones de circulación.

5.1.4 Estudio de Dispersión

Como parte del programa de despliegues, se han realizado varios ejercicios para estudiar la dispersión de la corriente medida por las boyas de deriva. Para ello se lanzan varias boyas simultáneamente y se analizan sus trayectorias y la divergencia entre ellas. Se han realizado cuatro ejercicios, uno durante el año 2006 en el que se desplegaron tres boyas de deriva al mismo tiempo y tres durante el año 2007, en estos casos se lanzaron cuatro boyas a la deriva simultáneamente en cada ejercicio. A continuación se pasan a describir los resultados obtenidos.

1º ejercicio noviembre 2006

El 4 de noviembre del 2006 se desplegaron tres boyas de deriva, las tres perdieron la draga antes del mes y medio de estar operando en el agua. En la siguiente figura se representan las trayectorias seguidas por las tres boyas de deriva desplegadas.

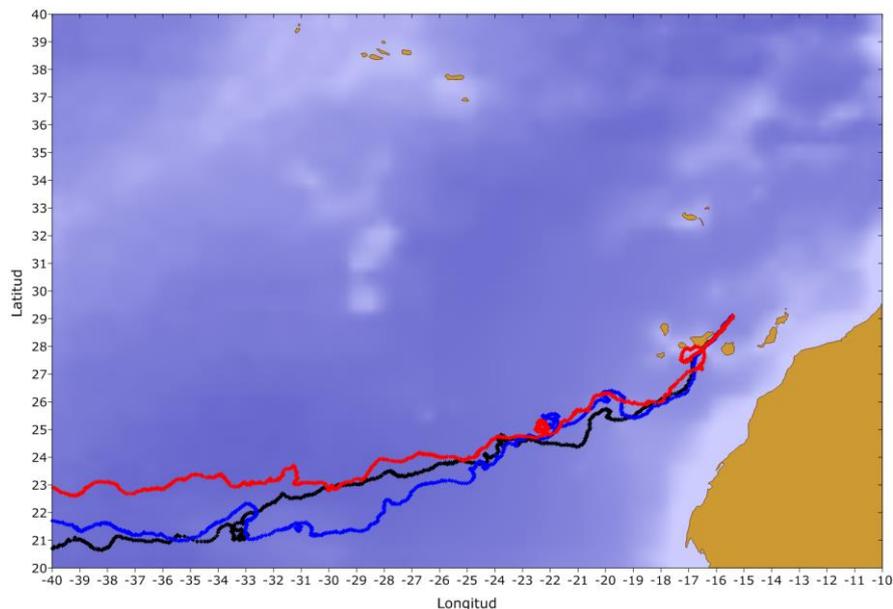


Figura 5.20. Trayectorias de las tres boyas de deriva desplegadas el 04/10/2006.

Inicialmente parece que las boyas siguen prácticamente la misma dirección sin grandes diferencias, hasta que pasan por el canal entre Tenerife y Gran Canaria donde empiezan a dispersarse.

Al salir del canal una de las boyas había perdido la draga, las otras dos que todavía la tenían operativa toman diferentes direcciones, una se queda retenida en un giro anticiclónico y la otra continúa dirección suroeste.

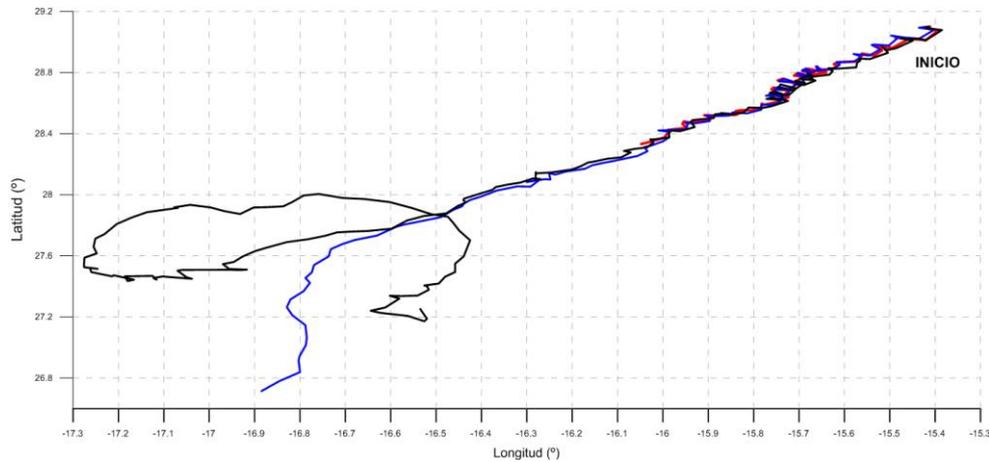


Figura 5.21. Trayectorias de las tres boyas de deriva desplegadas el el 04/10/2006, durante el periodo que tenían operativa la draga.

Para entender mejor la dispersión de las trayectorias, se ha representado la evolución en latitud y longitud para las tres boyas en conjunto. En las siguientes gráficas se puede apreciar como a partir de un cierto instante (a partir del 27/11/2006) las boyas empiezan a dispersarse en latitud y longitud. Tras 22 días en el agua es cuando se empieza a observar la dispersión de las trayectorias.

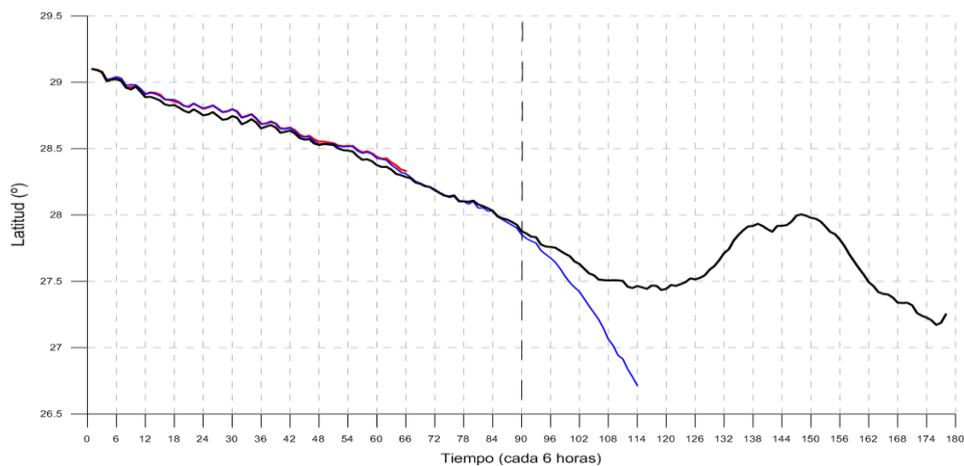


Figura 5.22. Evolución de la latitud seguida por las tres boyas de deriva desplegadas el 04/11/2006.

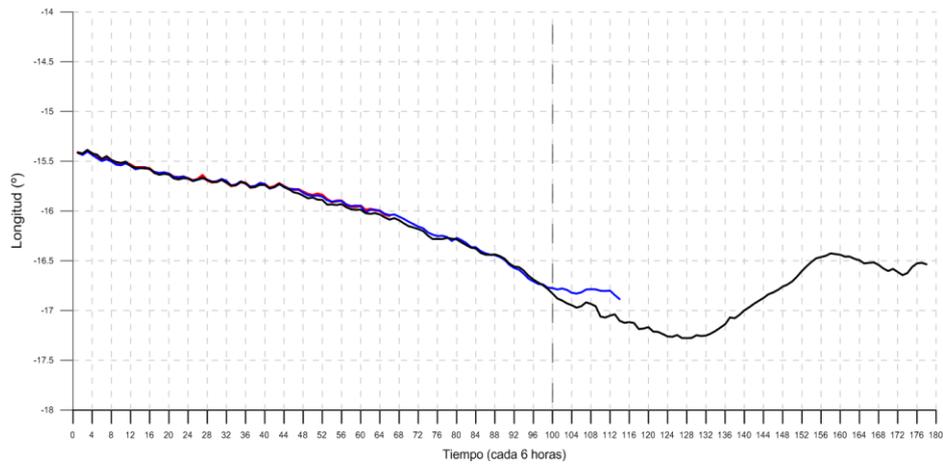


Figura 5.23. Evolución de la logitud seguida por las tres boyas de deriva desplegadas el 04/11/2006.

Si hacemos un zoom de la trayectoria inicial seguida por las tres boyas, podemos ver que siguen el mismo tipo movimiento, identificandose en los tres casos el mismo tipo de estrucutra mesoescalar (pequeños giros anticiclónicos), lo que da idea de lo preciso que pueden llegar a ser este tipo de dispositivos, para identificar estructuras de pequeña escala de la corriente superficial.

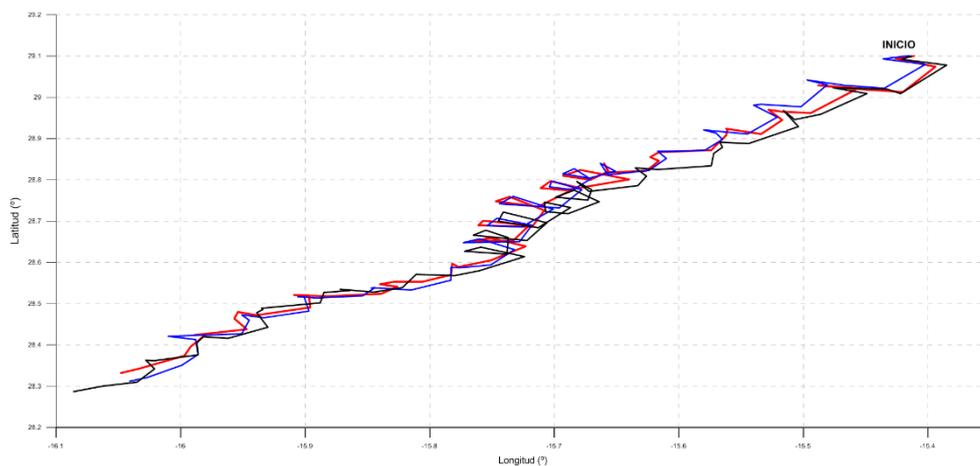


Figura 5.24. Zoom de las trayectorias de las tres boyas de deriva desplegadas el el 04/10/2006.

2º ejercicio febrero 2007

El 19 de febrero de 2007 se desplegaron cuatro boyas de deriva simultaneamente, de las cuatro boyas ninguna perdió la draga durante su periodo de operatividad. En la siguiente figura se represenan las trayectorias seguidas por las cuatro boyas de deriva.

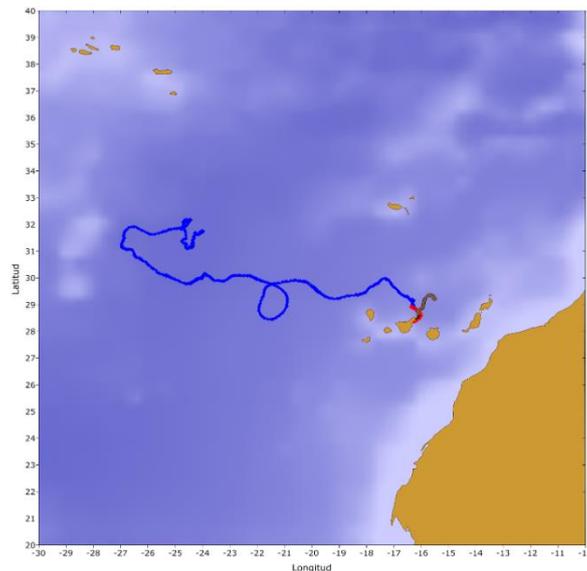


Figura 5.25. Trayectorias de las cuatro boyas de deriva desplegadas el 19/02/2007

Incialmente las cuatro boyas toman la misma direccción suroeste, tres de ellas impactan en la costa noreste de Tenerife y la cuarta, tras acercarse a la costa norte de la isla, toma una dirección noroeste.

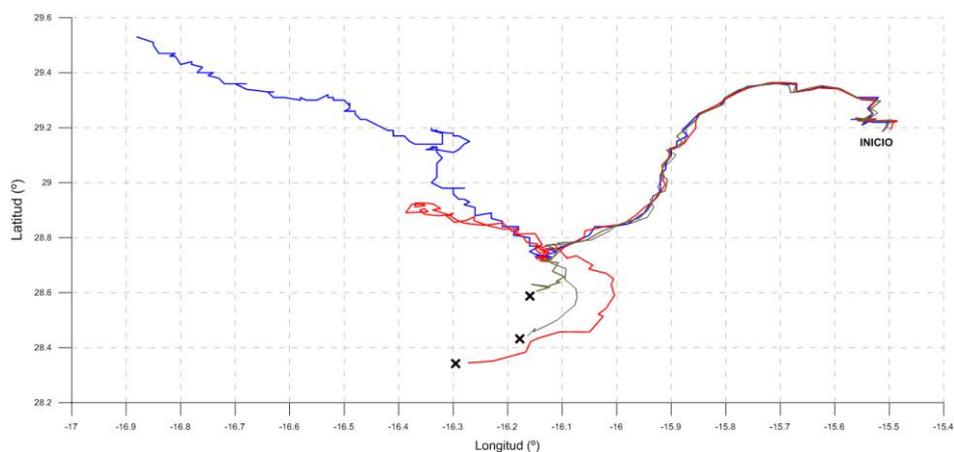


Figura 5.26. Trayectorias de las cuatro boyas de deriva desplegadas el el 19/02/2007. Las marcas (X) indican las zonas de impacto en la costa de la isla de Tenerife.

Tras representar la evolución en latitud y longitud para las cuatro boyas en conjunto, podemos observar que es a partir del día 13, desde el instante de su lanzamiento, cuando las trayectorias empiezan a dispersarse. El hecho de que tres de las cuatro boyas hayan impactado en la costa noreste de Tenerife, indica que durante los meses de febrero y marzo la probabilidad de impacto en la isla de Tenerife es muy elevada. Dos de las boyas impactaron en la costa el 06/03/2007 y la tercera el 22/03/2007.

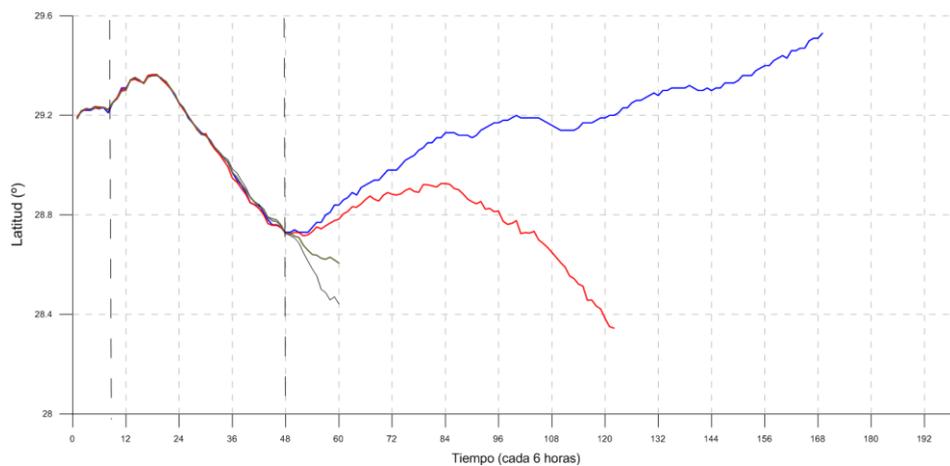


Figura 5.27. Evolución de la latitud seguida por las cuatro boyas de deriva desplegadas el 19/02/2007.

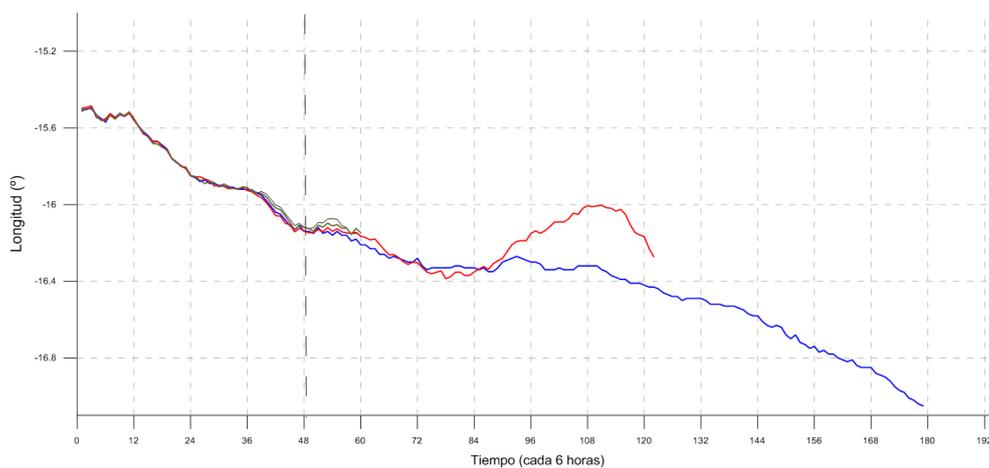


Figura 5.28. Evolución de la longitud seguida por las cuatro boyas de deriva desplegadas el 19/02/2007.

3º ejercicio junio 2007

El 6 de junio del 2007 se desplegaron cuatro boyas de deriva, una de las boyas no llegó a desplegar la draga, las otras tres la perdieron tras unos meses de operatividad (tras 2-3 meses en el agua). A continuación se representan las trayectorias seguidas por las cuatro boyas de deriva.

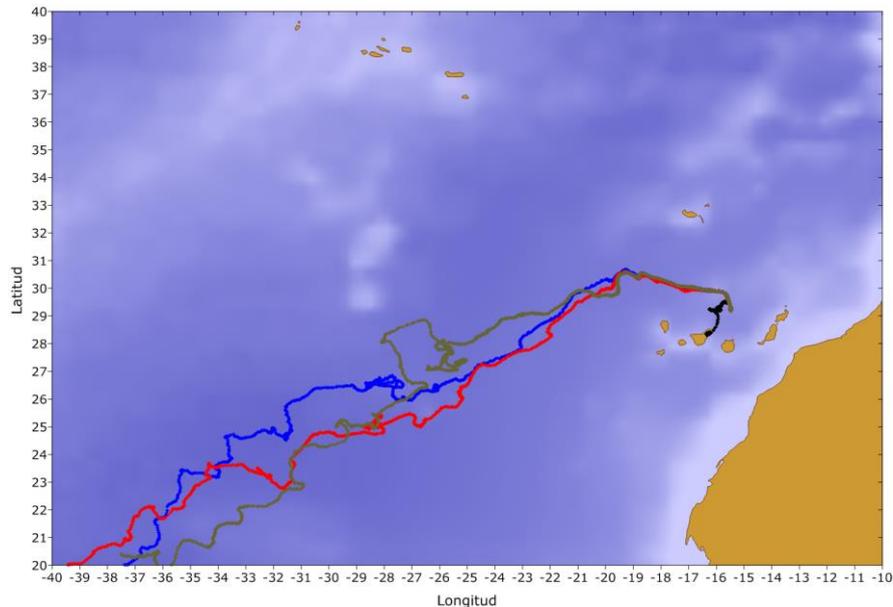


Figura 5.29. Trayectorias de las cuatro boyas de deriva desplegadas el 06/06/2007.

Destacamos como tres de las cuatro boyas toman inicialmente la misma dirección noroeste, la única boya que toma una dirección sur, para posteriormente impactar con la cota noreste de Tenerife, es la boya que no desplegó la draga, por lo que esta boya va a estar influenciada directamente por la acción del viento. A diferencia del periodo anterior, la probabilidad de impacto en la isla de Tenerife para los meses de junio y julio es muy baja. La boya que no desplegó la draga impactó en la costa de tenerife el 22/07/2007 tras un mes y medio a la deriva.

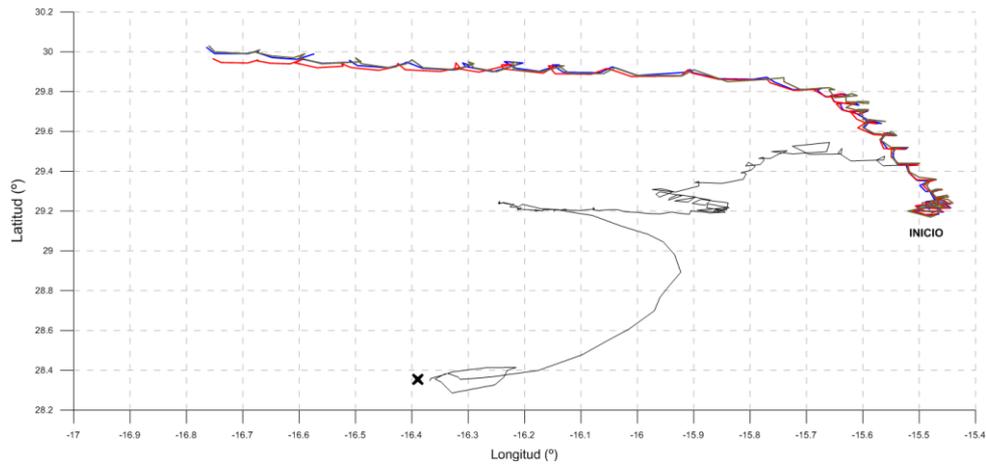


Figura 5.30. Trayectorias de las cuatro boyas de deriva desplegadas el el 06/06/2007. La trayectoria color negro corresponde con la boya que no desplegó la draga e impactó en la costa de Tenerife (marcado con una **X**).

Si observamos la evolución en latitud y longitud para las boyas en conjunto (Figura 5.31), podemos ver como hay dos zonas de dispersión identificadas. La primera se corresponde con el momento en el que la boya que no tiene la draga desplegada se desplaza hacia el sur, mientras que las otras tres boyas que si tienen la draga operativa se desplazan hacia el noroeste. Esta dispersión en las trayectorias no la tendremos en consideración debido a ausencia de la draga. El segundo punto de dispersión en las trayectorias se observa el 14/08/2007 tras dos meses de deriva. En ese momento las trayectorias de las boyas empiezan a dispersarse pero mantienen la tendencias en dirección hacia el suroeste. En ese punto de dispersión una de las tres boyas pierde la draga.

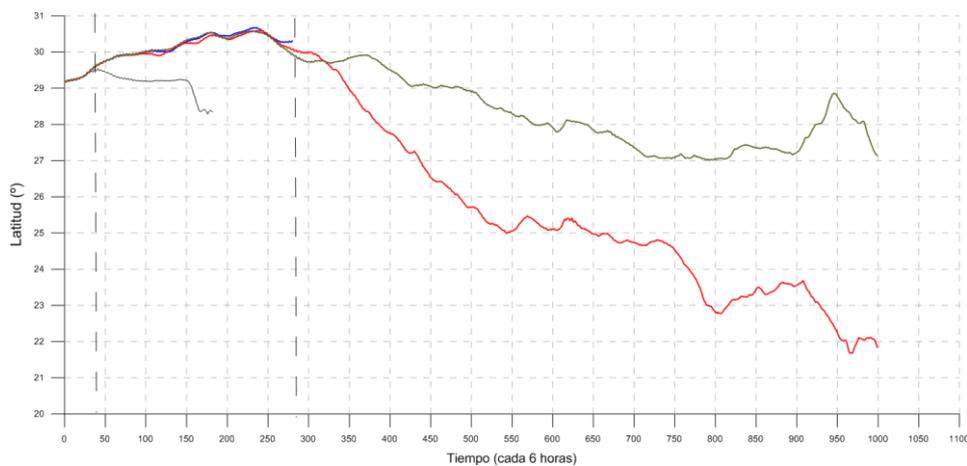


Figura 5.31. Evolución de la latitud seguida por las cuatro boyas de deriva desplegadas el 06/06/2007.

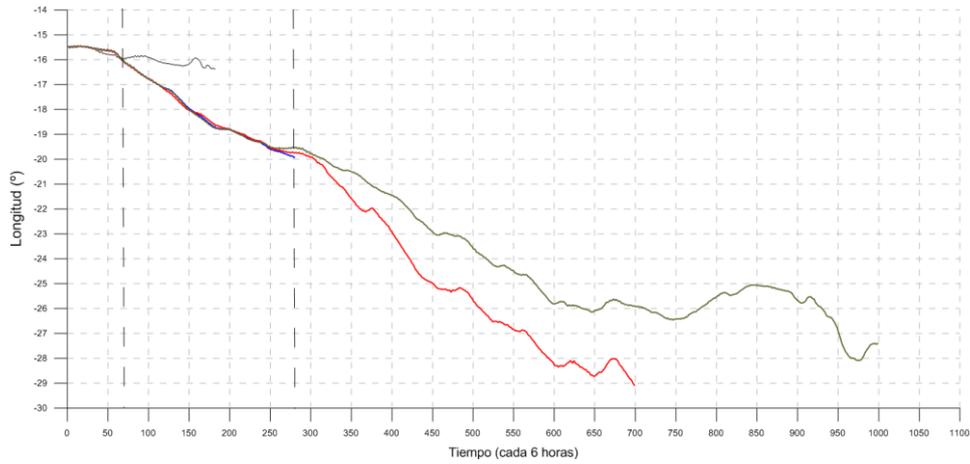


Figura 5.32. Evolución de la longitud seguida por las cuatro boyas de deriva desplegadas el 06/06/2007.

Si hacemos un zoom de las trayectorias iniciales seguidas por las tres boyas que tienen la draga operativa, podemos ver como se corresponden bastante, identificándose en los tres casos los mismos tipo de estructuras mesoescalares (pequeños remolinos anticiclónicos).

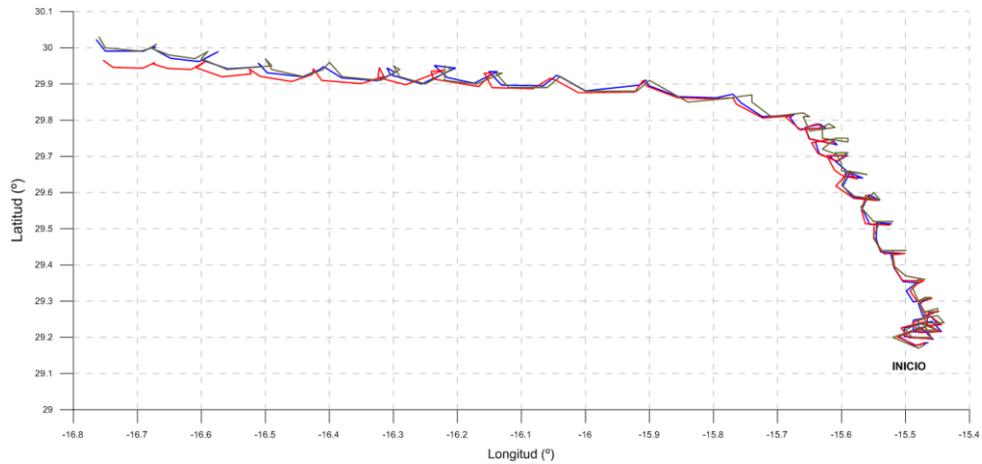


Figura 5.33. Zoom de las trayectorias de las tres boyas de deriva desplegadas el el 06/06/2007, con la draga operativa.

4º ejercicio octubre 2007

El 30 de octubre del 2007 se desplegaron cuatro boyas de deriva, tras un periodo de operatividad todas perdieron la draga (entre los 2 y 10 meses). A continuación se representan las trayectorias seguidas por las cuatro boyas de deriva.

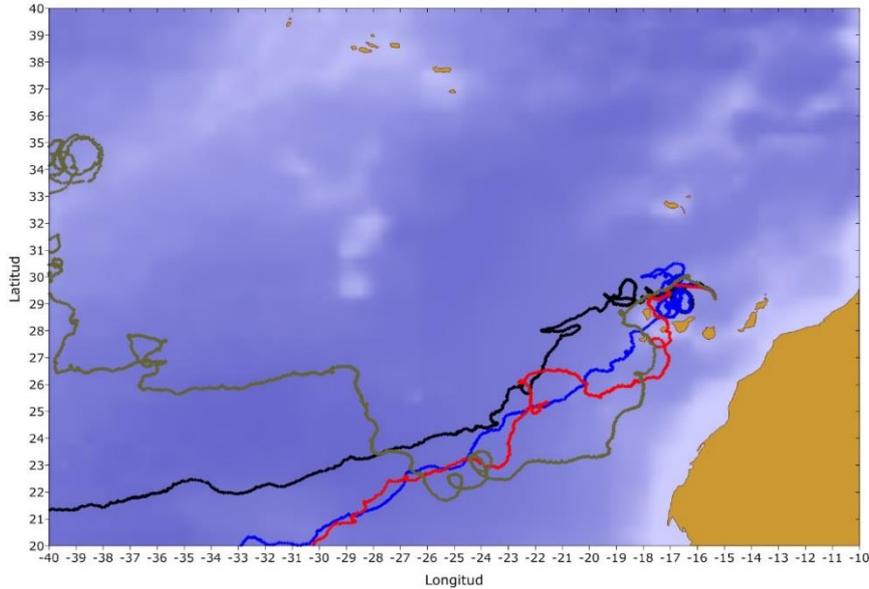


Figura 5.34. Trayectorias de las cuatro boyas de deriva desplegadas el 30/10/2007.

En esta ocasión las trayectorias son bastante más aleatorias que en los anteriores ejercicios. Aunque destacamos que durante los primeros días hay una gran relación entre las trayectorias. Todas las boyas coinciden en la trayectoria inicial hacia el noroeste y posteriormente se dispersan hacia suroeste. Dos de las boyas que toman dirección suroeste quedan retenidas en un giro ciclónico al norte de la isla de Tenerife.

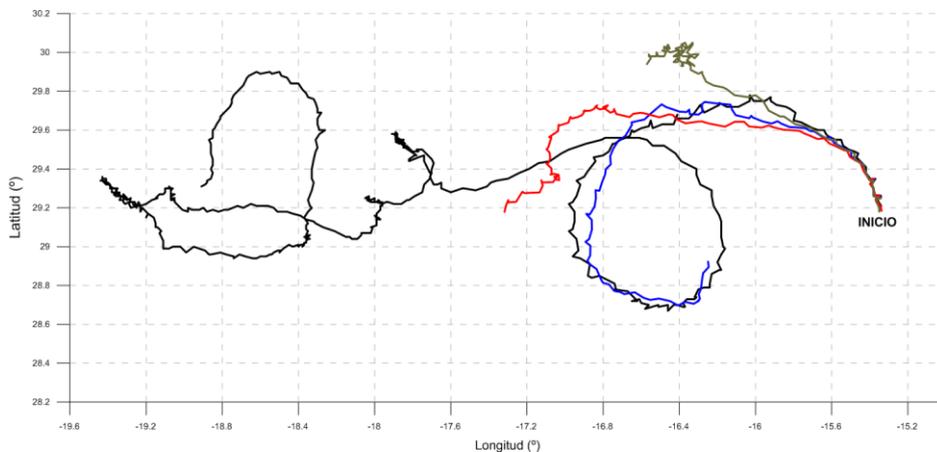


Figura 5.35. Trayectorias de las cuatro boyas de deriva desplegadas el el 30/10/2007, durante el periodo que tenían operativa la draga.

Tras representar la evolución en latitud y longitud para las cuatro boyas en conjunto, podemos observar que hay dos puntos de inflexión respecto a las trayectorias seguidas por las boyas. El primero se corresponde con el 11/11/2007 tras 11 días desde el momento del lanzamiento y el segundo se corresponde con el 06/12/2007 tras un mes y una semana.

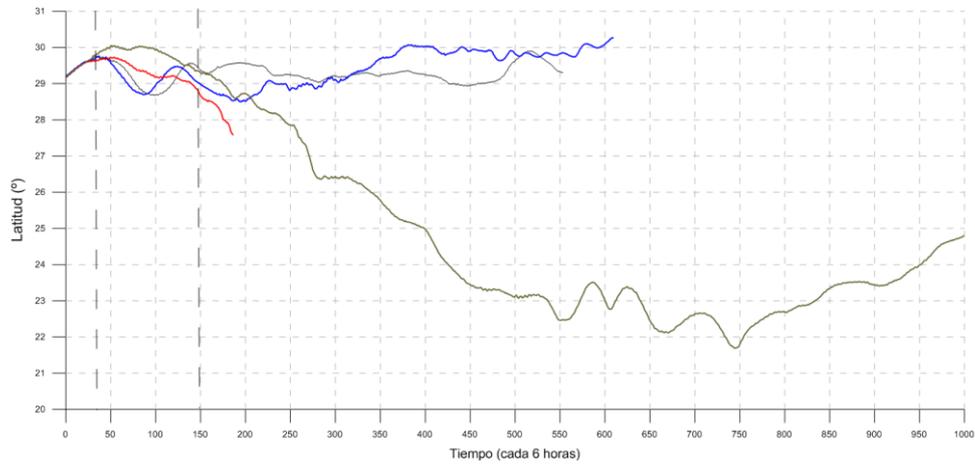


Figura 5.36. Evolución de la latitud seguida por las cuatro boyas de deriva desplegadas el 30/10/2007.

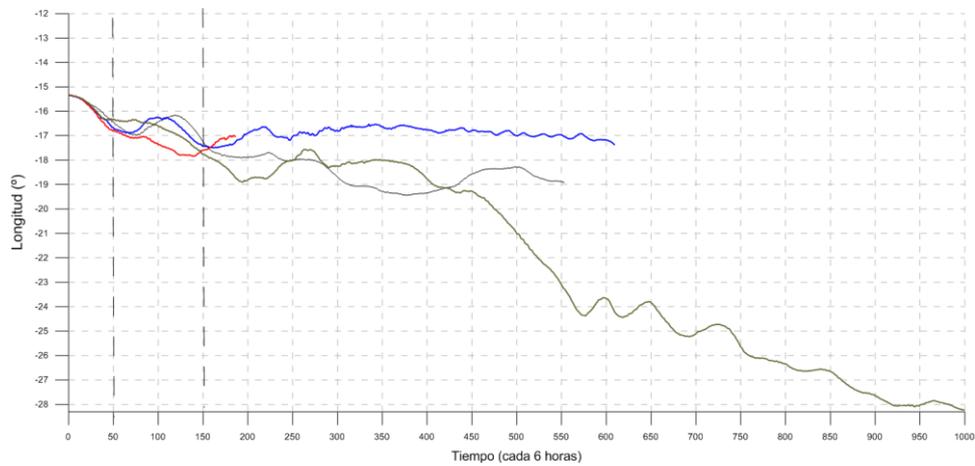


Figura 5.37. Evolución de la longitud seguida por las cuatro boyas de deriva desplegadas el 30/10/2007.

En general para los cuatro ejercicios realizados la trayectoria inicial en un periodo comprendido entre los 11 y 22 primeros días presentan una correlación bastante óptima, identificándose pequeñas estructuras mesoescalares de modo simultáneo en varios de los ejercicios. Es a partir de un cierto tiempo (que podemos considerarlo en torno a los primeros 15 días) cuando las boyas tienden a dispersarse.

Estas diferencias en las trayectorias a partir de un cierto tiempo evidencian la aleatoriedad que siguen los objetos que se encuentran a la deriva en la capa superficial del océano. En nuestro caso esta aleatoriedad puede ser debida por dos motivos, por la variabilidad de la Corriente de Canarias y por el efecto que producen las islas al paso de la corriente. Estos dos efectos han quedado identificados en los ejercicios realizados. Por un lado, en el ejercicio de noviembre de 2006, se observa mayor dispersión tras pasar las boyas por el canal entre las islas de Tenerife y Gran Canaria. Del mismo modo, para el ejercicio de octubre de 2007, se evidencia una mayor dispersión respecto a los periodos anteriores, lo que indica una mayor variabilidad de la corriente para ese periodo.

Con los resultados obtenidos podemos constatar que las boyas de deriva son un recurso muy fiable para el estudio de las corrientes superficiales, así como para la identificación de estructuras mesoescalares.

5.2. Análisis temporal

Para todas las trayectorias individuales de las boyas, siempre y cuando tengan operativa la draga, se han calculado las estadísticas de la velocidad para todo el conjunto de datos por años y por meses. Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes tablas y figuras, donde se representa el ciclo medio y máximo anual, así como el ciclo medio y máximo mensual para todo el periodo de estudio. En la Tabla 5.1 y 5.2 se pueden ver los valores máximos, mínimos, la media y la desviación estándar de la velocidad obtenidos del análisis estadístico.

5.2.1. Estadísticas anuales y mensuales

Con respecto al ciclo medio anual de la velocidad, se observa una tendencia del aumento de la velocidad con los años. Observándose en los 10 primeros años de la serie de datos (entre 1999-2009), como la velocidad se organiza en ciclos de cinco años. Se observa como la velocidad aumenta durante dos años consecutivos (hasta alcanzar un valor máximo), seguido de un periodo de tres años consecutivos de descensos (hasta alcanzar un mínimo). Este comportamiento no se observa en el periodo de 2009-2012. Hay que tener en cuenta que son los años 2010 y 2012 los que menor densidad de datos tienen respecto a la serie completa, por lo que hay que tener cautela a la hora de interpretar los resultados estadísticos para esos años, debido al sesgo en la distribución de los datos respecto al resto de la serie. La velocidad media anual es de 13,5 cm/s. La máxima velocidad media anual fue de 22,27 cm/s en el año 2010. La mínima velocidad media anual se registró en el año 1999 y fue de 11,03 cm/s. Con respecto a la velocidad máxima registrada fue en el año 2003 y alcanzó los 100,44 cm/s.

Con respecto al ciclo medio mensual, se observan que los valores mínimos se corresponden con los meses de enero y febrero (12,48 y 12,37 cm/s respectivamente). A partir del mes de febrero se produce un aumento de la velocidad, alcanzándose el máximo en el mes de julio, con una velocidad media de 14,22 cm/s. A partir del mes de julio la velocidad media mensual vuelve a disminuir. La velocidad máxima registrada fue en el mes de agosto (100,44 cm/s).

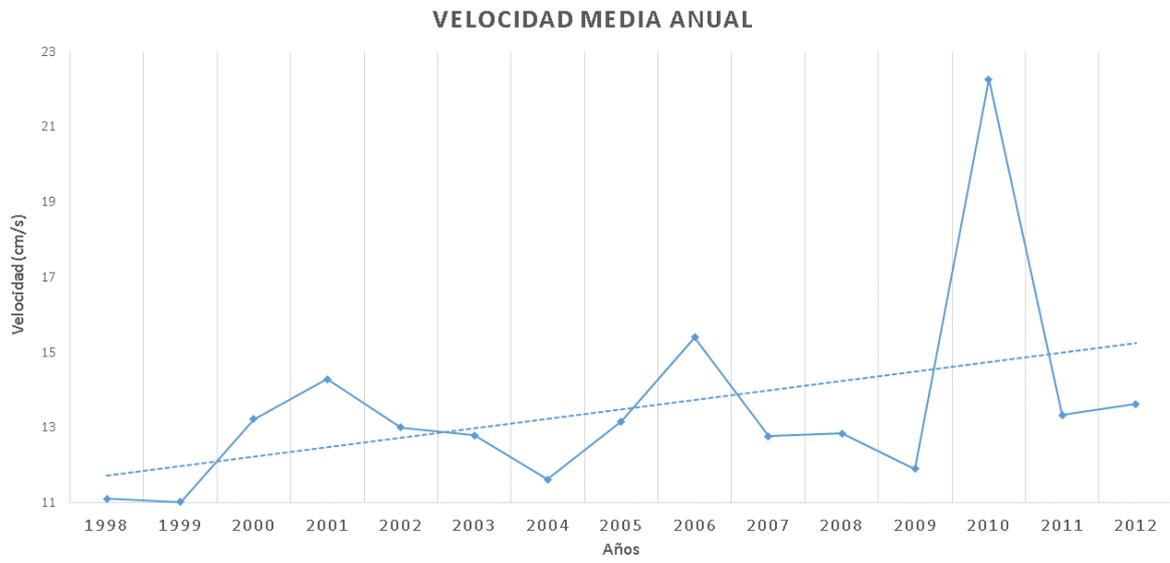


Figura 5.38. Ciclo medio anual de la velocidad (cm/s) para los 15 años de datos

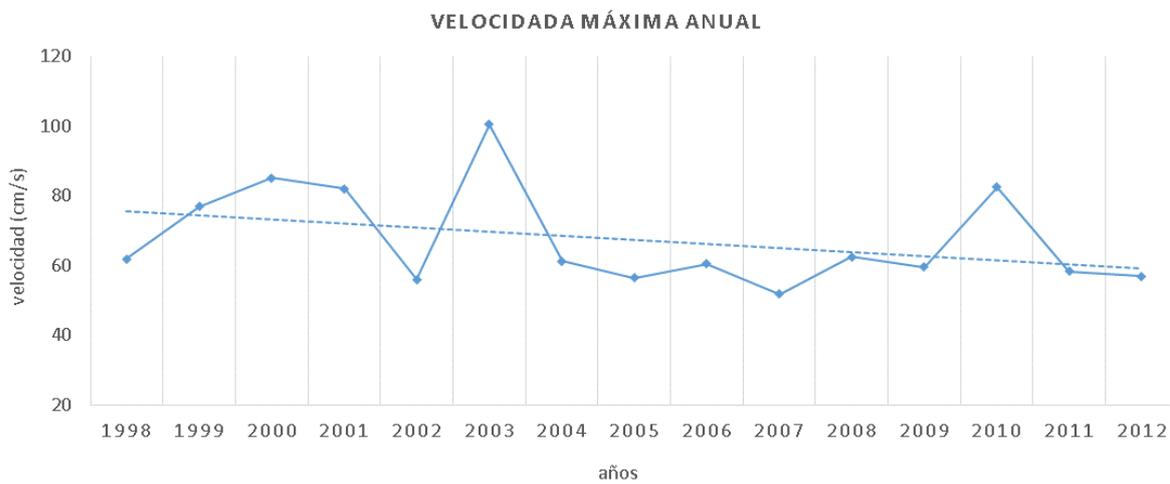


Figura 5.39. Velocidad máxima anual (cm/s) para los 15 años de datos

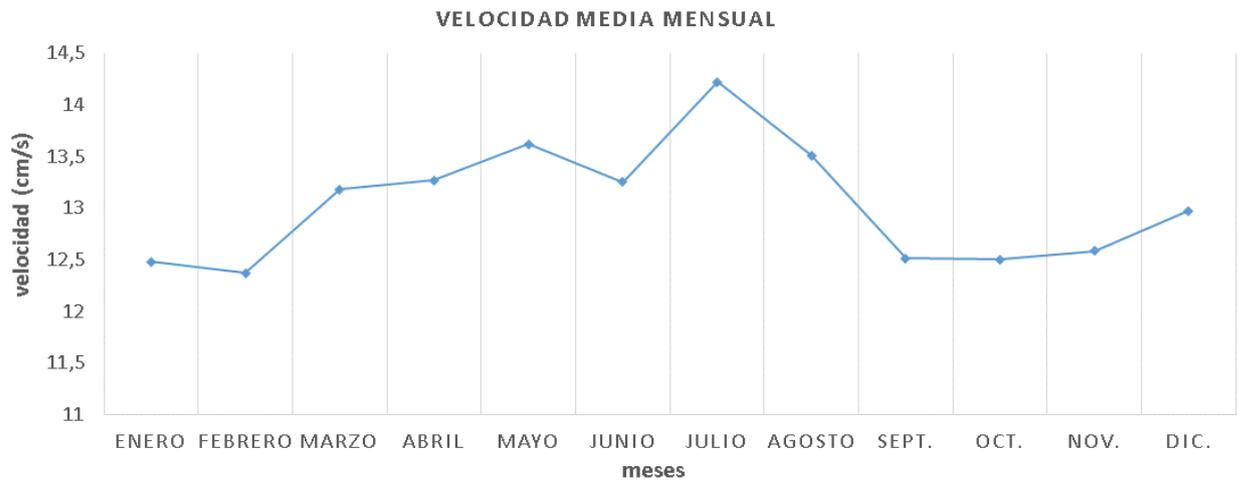


Figura 5.40. Ciclo medio mensual de la velocidad (cm/s) para los 15 años de datos

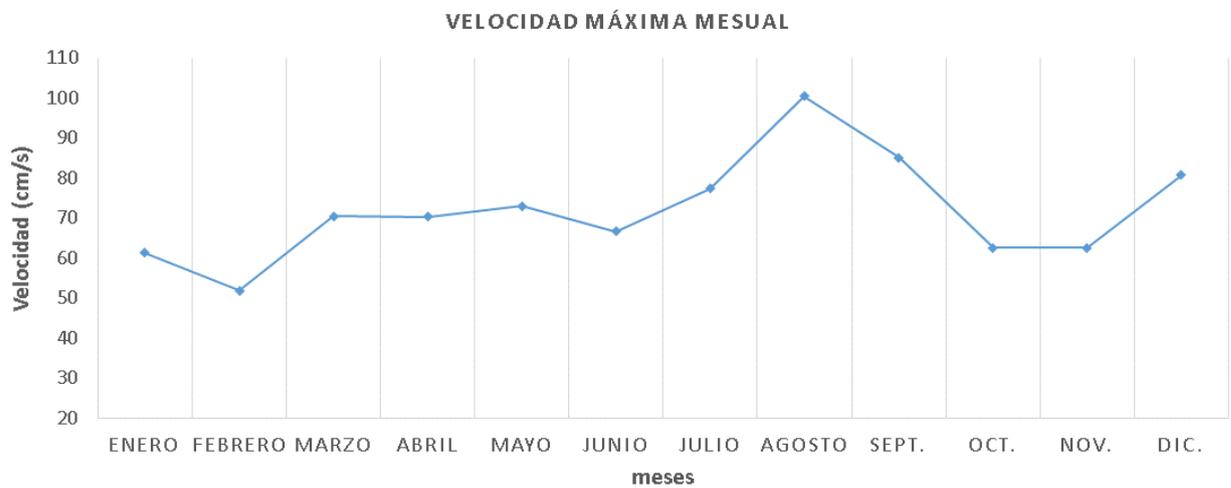


Figura 5.41. Velocidad máxima mensual (cm/s) para los 15 años de datos

AÑOS	nº registros	Velocidad (cm/s)			
		max.	min.	med.	desv. Std.
1998	3.988	61,93	0,18	11,11	5,46
1999	9.085	76,98	0,29	11,03	5,3
2000	19.452	85,11	0,10	13,23	6,64
2001	27.283	82,01	0,09	14,29	7,07
2002	17.840	56,06	0,08	13,01	6,39
2003	16.628	100,44	0,09	12,8	6,14
2004	19.803	61,26	0,12	11,63	5,5
2005	12.376	56,54	0,15	13,17	5,72
2006	11.115	60,47	0,50	15,4	7,12
2007	20.031	51,81	0,18	12,78	5,5
2008	19.885	62,55	0,08	12,85	6,6
2009	9.828	59,55	0,08	11,9	5,56
2010	3.686	82,58	0,25	22,27	11,43
2011	6.151	58,32	0,16	13,34	5,94
2012	3.672	56,92	1,54	13,63	6,08

Tabla 5.1. Estadísticas anuales para la serie de datos.

MESES	nº registros	Velocidad (cm/s)			
		max.	min.	med.	desv.Std.
Enero	7.468	61,26	0,16	12,48	5,86
Febrero	6.960	51,81	0,08	12,37	5,5
Marzo	8.053	70,4	0,18	13,18	6,09
Abril	7.625	70,26	0,39	13,27	6,03
Mayo	7.283	72,91	0,12	13,62	6,36
Junio	6.503	66,65	0,11	13,25	6,1
Julio	6.689	77,26	0,18	14,22	7,57
Agosto	6.656	100,44	0,15	13,51	7,16
Septiembre	6.471	85,11	0,08	12,51	6,87
Octubre	7.009	62,46	0,08	12,5	6,55
Noviembre	7.767	62,57	0,09	12,58	6,15
diciembre	8.304	80,64	0,16	12,97	6,51

Tabla 5.2. Estadísticas mensuales para la serie de datos.

5.3 Análisis Espacial

La distribución espacial y temporal de los registros obtenidos por las boyas de deriva no son homogéneos ni en el tiempo ni en el espacio. Como ya se comentó en el correspondiente apartado de análisis de los datos, para homogeneizar las observaciones se van a hacer mapas pseudo-eulerianos a partir de las medidas lagrangianas de las boyas.

Nuestra zona de estudio va a estar delimitada en torno al archipiélago canario (24°-31° norte y 22°- 12° oeste). El área ha sido dividida en cuadrículas de 1° x 1° (100 km x 100 km). A cada cuadrícula se le contabiliza el número de registros de boyas que contiene y se considera a esa serie de datos como una serie temporal, a la que se le realizan una serie de análisis estadísticos. En la siguiente figura se representa el registro total de datos para cada una de las cuadrículas de 1°x1° en la que se ha definido la zona, los datos han sido interpolados por el método Kriging.

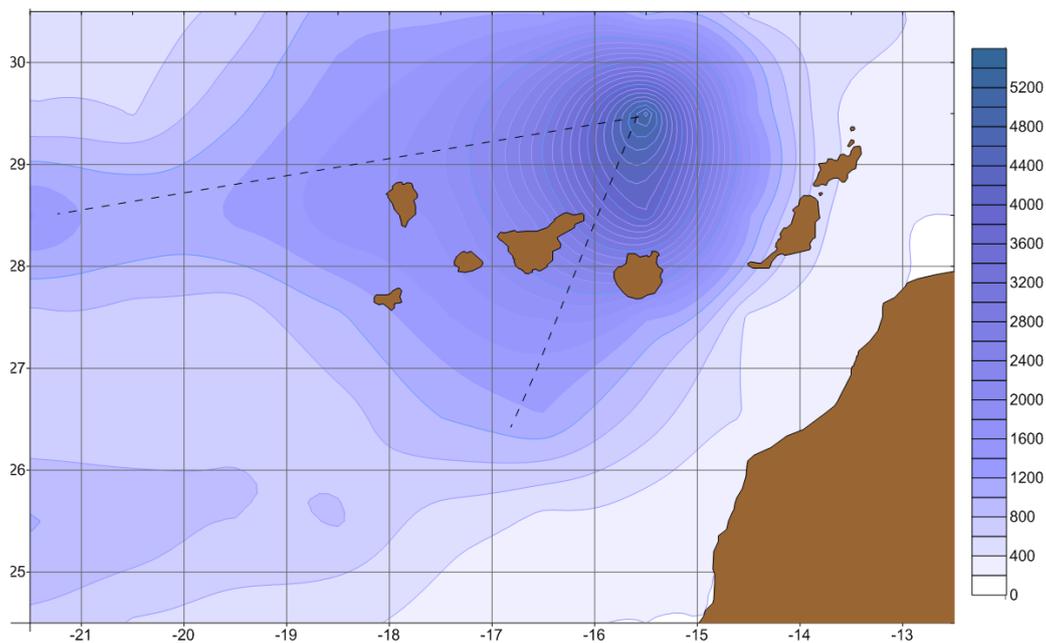


Figura 5.42. Distribución del número de registros de las boyas de deriva para cada cuadrícula (1°x1°) interpolados mediante un Kriging. Las líneas discontinuas representan las principales rutas.

Se observa que el mayor número de registros está en torno a la Estación Europea de Series Temporales Oceánicas de Canarias (ESTOC), que es donde se despliegan todas las boyas. En la distribución de los datos se aprecia la tendencia hacia el suroeste pasando entre los canales de las islas, así como la tendencia hacia el oeste, como se comentó en el anterior apartado donde se describieron las principales rutas seguidas por las boyas. Destacamos una zona al suroeste de las islas donde se aprecia una menor presencia de datos (en torno a los 27°norte y 20°oeste). Observamos también en la distribución del número de registros, la ausencia de datos entre la costa de África y las islas de Lanzarote y Fuerteventura debido a la ausencia de boyas en esa zona.

Con respecto al rango en el número de registros por cuadrícula, el mínimo se encuentra entre 0-7 registros cerca de la costa de África. Por el contrario, la cuadrícula situada en torno a 29.5° norte y 15.5° oeste, que se corresponde donde se han desplegado todas las boyas, tiene un total de 5.265 registros. El número de boyas por cuadrícula oscila desde 0- 1 en la región cerca de la costa de África, hasta más de 100 boyas por cuadrícula al norte de las islas, cerca de donde se han desplegado las boyas. Estas diferencias en la distribución del número de registros por cuadrícula, hay que tenerla en cuenta a la hora de interpretar los resultados estadísticos.

5.3.1 Mapas estacionales

Tras agrupar los datos de las boyas en cuadrículas de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, estos han sido separados en cuatro periodos para obtener los mapas estacionales de la corriente superficial. La distribución del número de registros por estaciones para la serie completa se representa en la Figura 5.43, donde se observa que el periodo de va de julio a septiembre presenta un número de registros bastante inferior con respecto al resto de las estaciones, lo que puede influir en los resultados estadísticos.

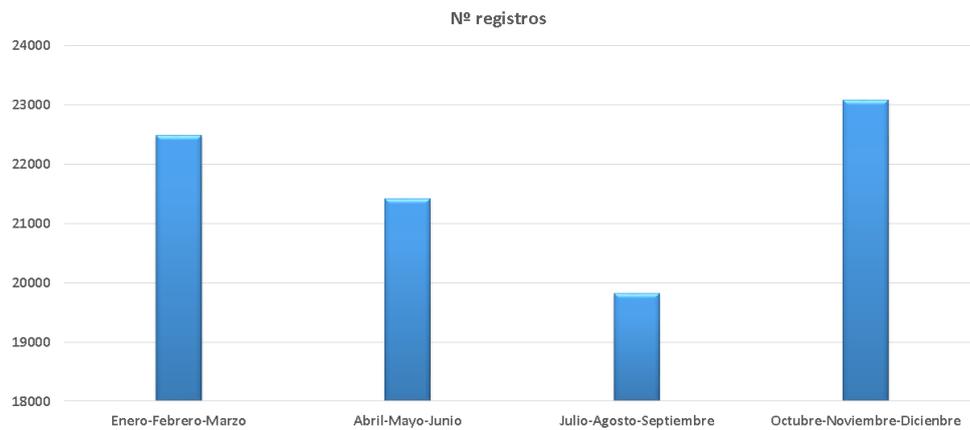


Figura 5.43. Número de registros para la serie completa distribuidos por estaciones.

Para este estudio solo vamos a tener en cuenta los registros de las boyas que quedan contenidos dentro del área (24° - 31° norte y 22° - 12° oeste). La distribución del número de registros por estaciones para la zona de estudio se representa en la siguiente figura.

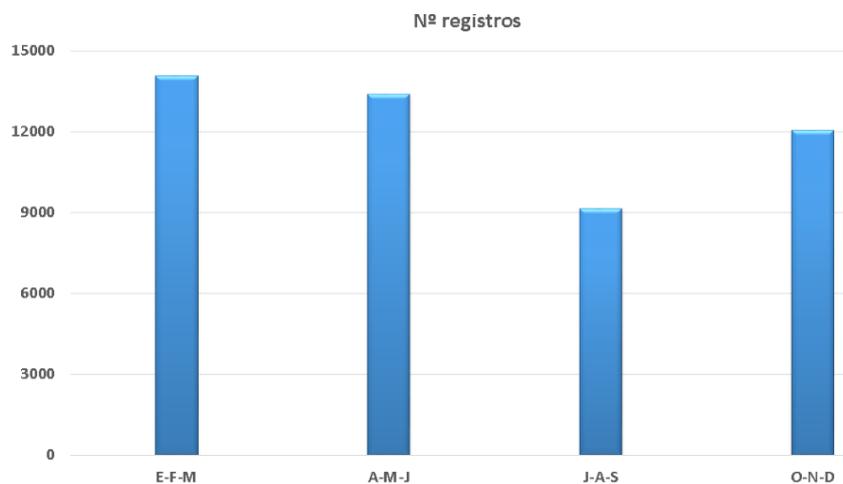


Figura 5.44. Número de registros para el área de estudio distribuidos por estaciones.

Para las cuatro estaciones en las que se ha dividido la serie se calcula el valor medio, el máximo, el mínimo y la desviación estándar de la intensidad de la velocidad. Los resultados se presentan en la Tabla 5.3.

	n° registros	Velocidad (cm/s)			
		max.	min.	med.	desv.Std.
Enero-febrero-marzo	14.076	70,40	0,08	13,00	7,8
Abril-mayo-junio	13.388	66,65	0,11	13,49	8,3
Julio-agosto-septiembre	9.144	100,44	0,13	15,26	12,5
Octubre-noviembre-diciembre	12.047	63,65	0,09	14,50	9,8

Tabla 5.3. Estadísticas de los datos registrados por estaciones para el área de estudio.

Del mismo modo, a los datos contenidos en cada una de las cuadrículas de 1°x1°, se les calcula el valor medio de la velocidad (en intensidad y dirección). Los resultados obtenidos son representados mediante mapas vectoriales para cada una de las estaciones, así como para la serie completa (1998-2012). La intensidad del flujo (longitud del vector) y la dirección (orientación del vector) nos va a permitir caracterizar la corriente superficial y ver las tendencias estacionales. Los mapas vectoriales están interpolados por el método Kriging para el suavizado de los resultados.

Para cada una de las estaciones, así como para la serie completa, también se van a representar los mapas de las trayectorias, así como la velocidad registrada por las trayectorias individuales. Lo que nos dará una idea de la distribución de los datos antes de interpretar los mapas vectoriales de la corriente.

Enero-febrero-marzo

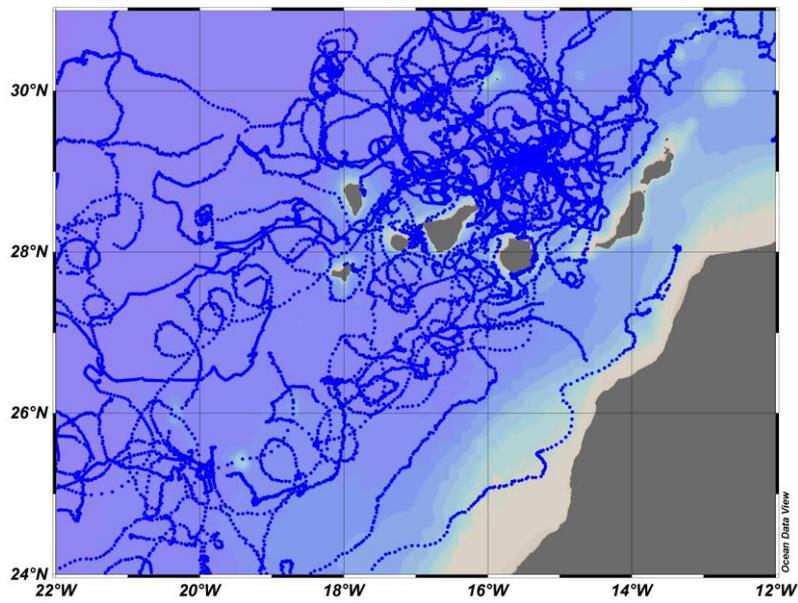


Figura 5.45. Trayectorias de todas las boyas de deriva para el periodo de enero-febrero-marzo.

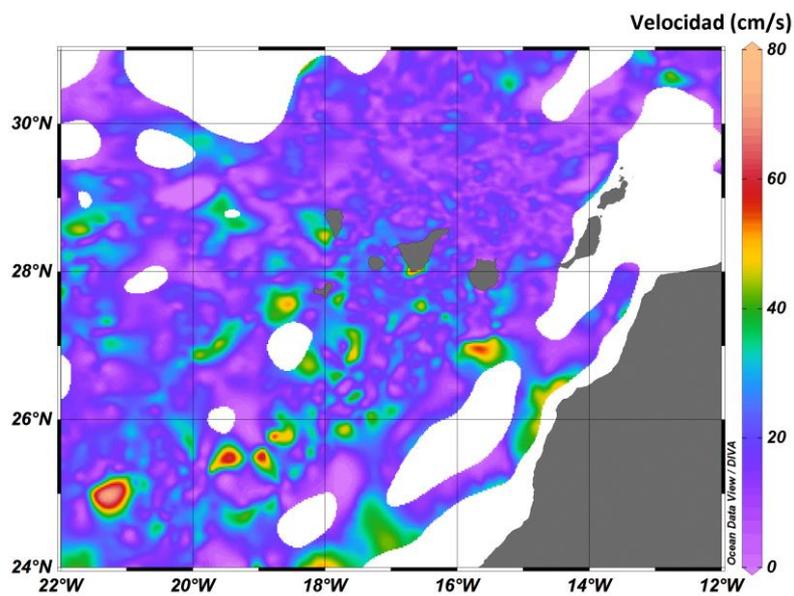


Figura 5.46. Velocidades registradas por las trayectorias individuales de las boyas de deriva durante el periodo de enero-febrero-marzo interpoladas mediante un Kriging.

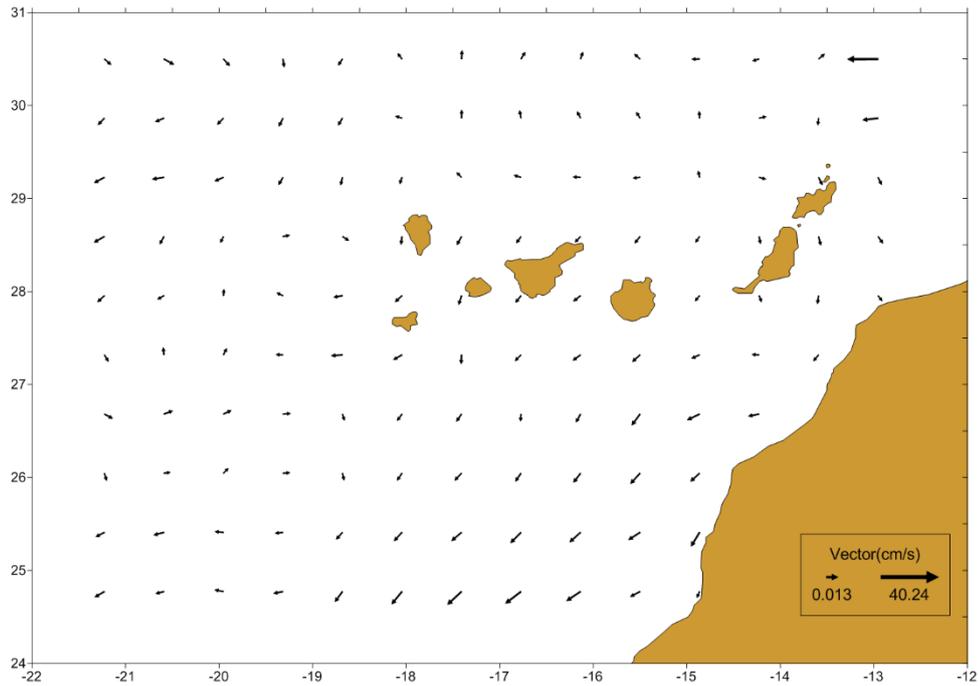


Figura 5.47. Mapa estacional (enero-febrero-marzo) donde se representa el vector medio de la velocidad para cada una de las cuadrículas de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ para el periodo 1998-2012.

Para el periodo correspondiente de enero a marzo la velocidad media es de 13 cm/s. Se observa en el mapa que al norte de las islas se registran los valores medios más bajos, con velocidades medias en torno a los 11 cm/s. Al norte de las islas se observa una alta variabilidad en cuanto a la dirección, con una tendencia hacia el norte. En los canales de las islas la velocidad media aumenta respecto a la registrada al norte, alcanzando velocidades medias en torno a los 14 cm/s. Entre los canales de las islas la tendencia en dirección es claramente hacia el suroeste, con una componente sureste al este de las islas de Lanzarote y Fuerteventura. Se aprecia la formación de una estructura anticiclónica al oeste de las islas de La Palma y El Hierro. Las velocidades máximas se dan al suroeste de las islas, registrándose velocidades medias en torno a los 18 cm/s. La velocidad máxima se registra cerca de la costa de África (25.5° norte, 15° oeste). Al sur de las islas la tendencia en dirección es claramente hacia el suroeste, observándose en torno a los 26° norte y 19° oeste, la formación de una estructura anticiclónica.

Abril-mayo-junio

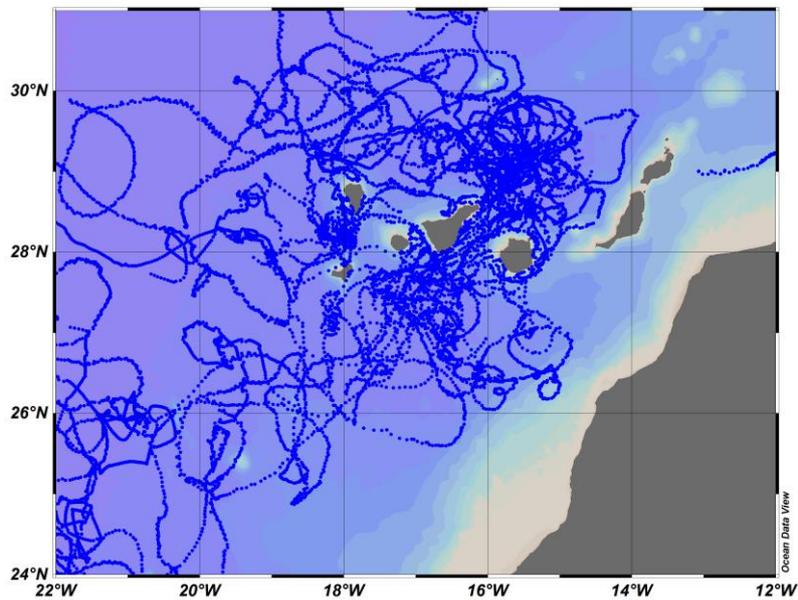


Figura 5.48. Trayectorias de todas las boyas de deriva para el periodo de abril-mayo-junio.

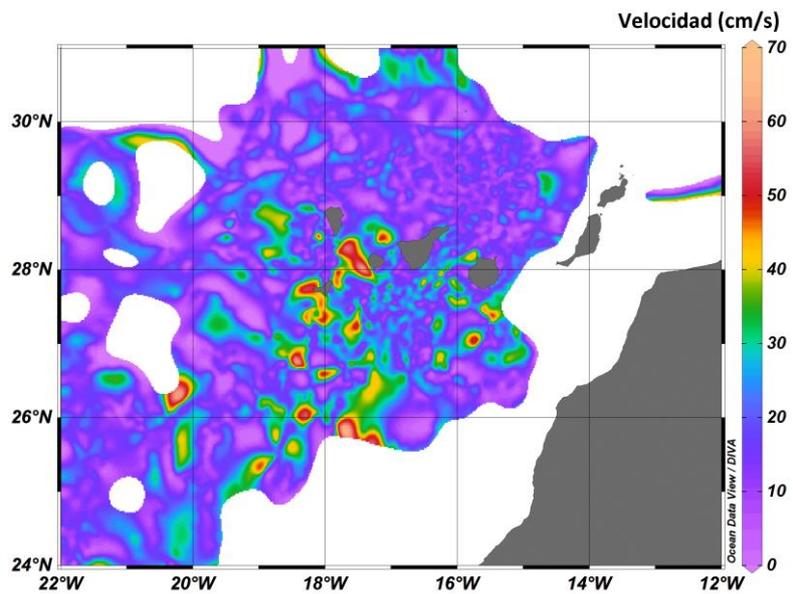


Figura 5.49. Velocidades registradas por las trayectorias individuales de las boyas de deriva durante el periodo de abril-mayo-junio interpoladas mediante un Kriging.

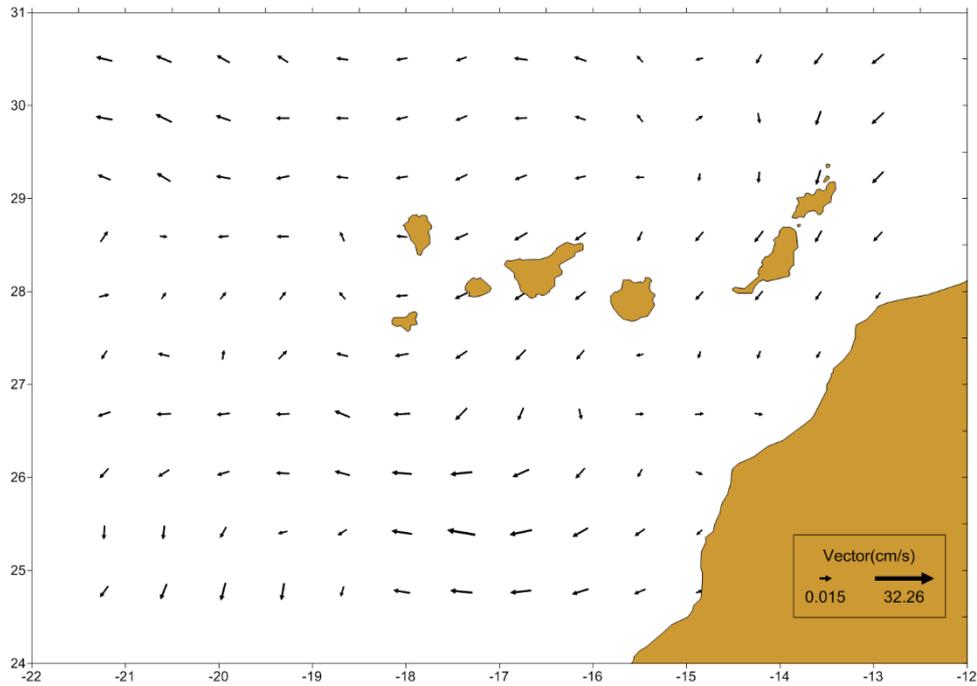


Figura 5.50. Mapa estacional (abril-mayo-junio) donde se representa el vector promedio de la velocidad para cada una de las cuadrículas de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ para el periodo 1998-2012.

Para el periodo correspondiente de abril a junio se observa una intensificación de la corriente respecto al periodo anterior con una velocidad media de 13,5 cm/s. Al norte de las islas las velocidades medias están en torno a los 12 cm/s, con una clara tendencias en dirección hacia el oeste, a partir de la longitud 16° oeste. En los canales entre las islas se parecía una marcada tendencia dirección suroeste con un aumento de la velocidad, con velocidades medias de 13 cm/s. Al oeste de las islas de La Palma y El Hierro se observa una corriente dirección norte y la formación de una estructura ciclónica. Las máximas velocidades se dan al suroeste de las islas donde se aprecia una tendencia de la dirección hacia el oeste y suroeste. La máxima velocidad media registrada es de unos 32 cm/s, al suroeste de las islas (25.5° norte y 17.5° oeste).

Julio-agosto-septiembre

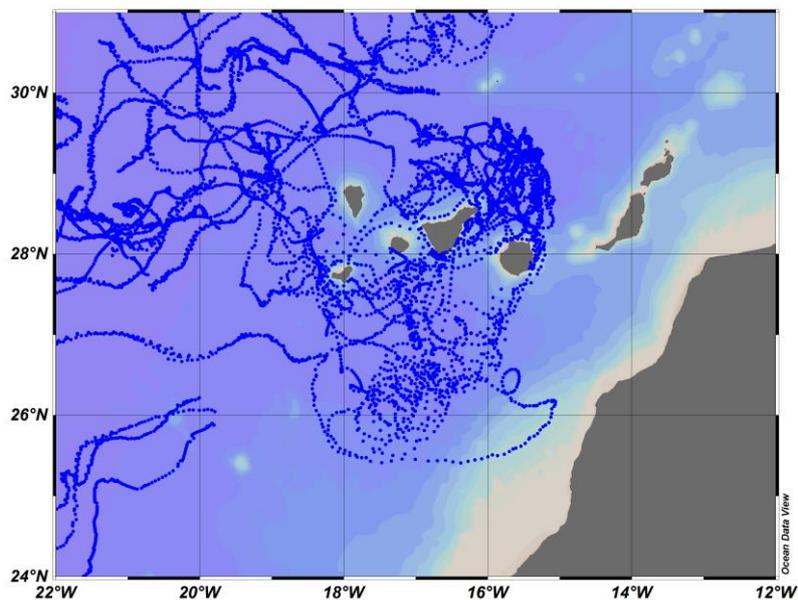


Figura 5.51. Figura 40. Trayectorias de todas las boyas de deriva para el periodo de julio-agosto-septiembre.

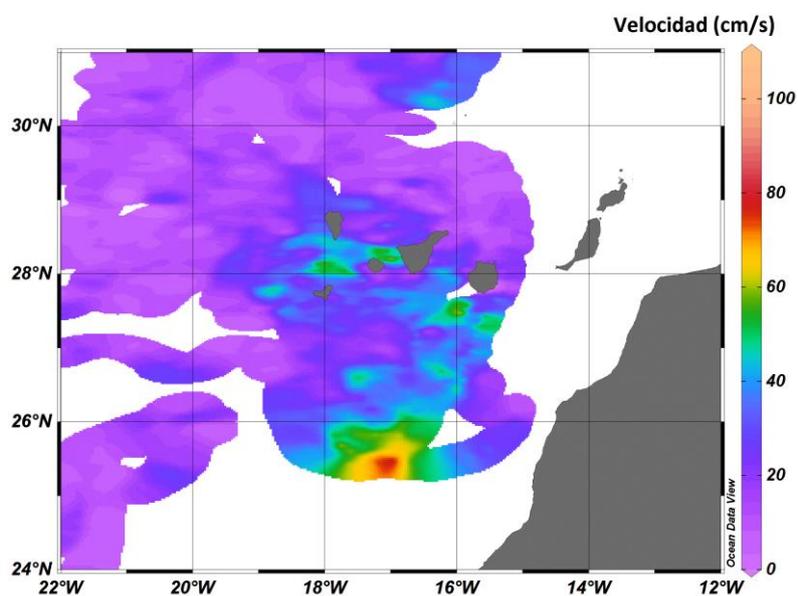


Figura 5.52. Velocidades registradas por las trayectorias individuales de las boyas de deriva durante el periodo de julio-agosto-septiembre interpoladas mediante un Kriging.

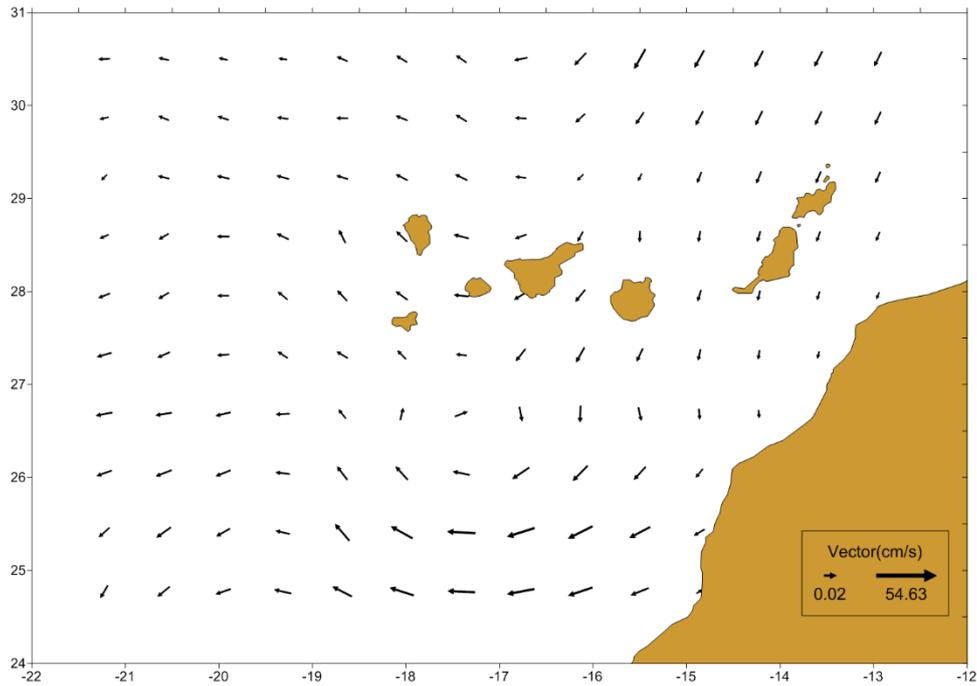


Figura 5.53. Mapa estacional (julio-agosto-septiembre) donde se representa el vector promedio de la velocidad para cada una de las cuadrículas de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ para el periodo 1998-2012.

Para el periodo que corresponde de julio a septiembre, es cuando se registran las máximas velocidades con una velocidad media de 15,3 cm/s. Al norte de las islas se dan velocidades medias en torno a los 14 cm/s, con una dirección predominante suroeste al norte de las islas más orientales y una dirección oeste a partir de la longitud 17° oeste. Las velocidades se intensifican en los canales con velocidades medias de 17 cm/s, y con una dirección predominante hacia el suroeste en las islas orientales y una tendencia oeste en las islas occidentales. Se observa al oeste de la isla de La Palma y de El Hierro una tendencia en dirección hacia el noroeste. Las velocidades máximas se registran al sur de las islas, con velocidades medias de 24 cm/s. Se observa la formación de una estructura anticiclónica al sur de las islas, donde se alcanzan las máximas velocidades medias. En torno a 25.5° norte y 16.5° oeste se registra la máxima velocidad media que alcanza los 54 cm/s.

Octubre-noviembre-diciembre

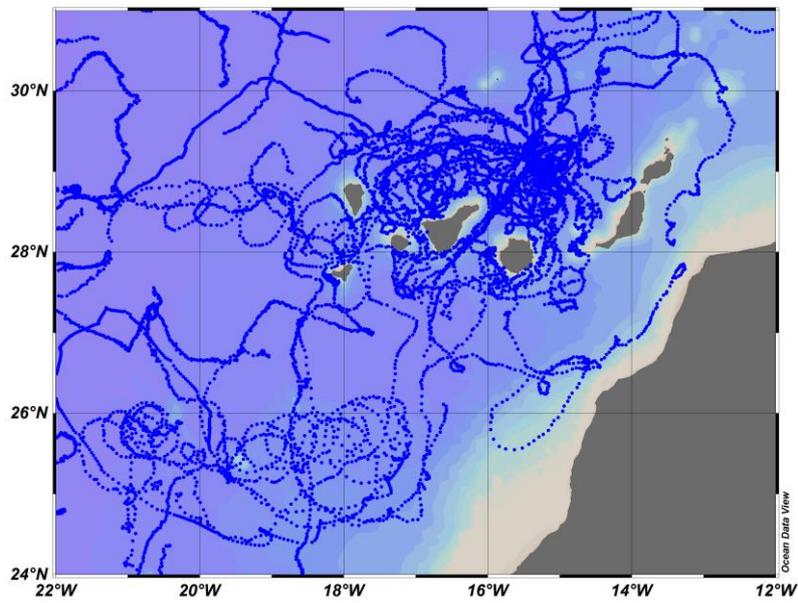


Figura 5.54. Trayectorias de todas las boyas de deriva para el periodo de octubre-noviembre-diciembre.

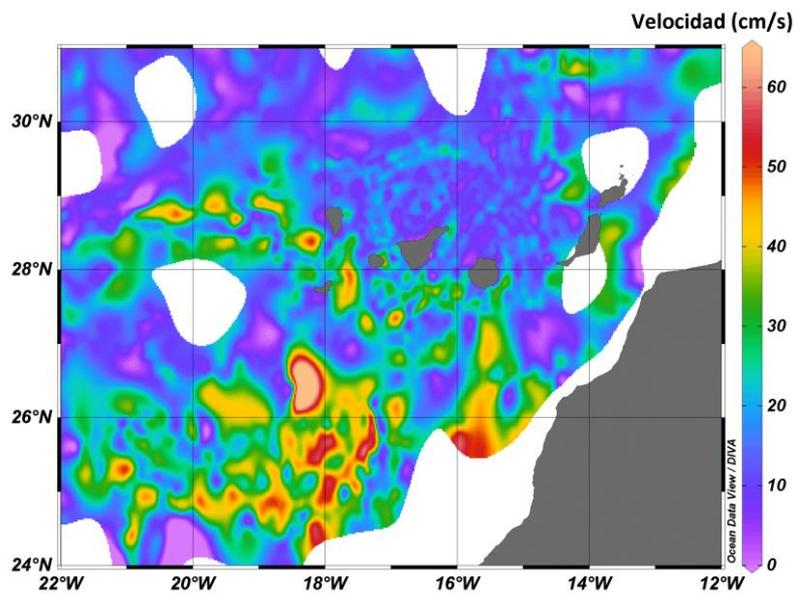


Figura 5.55. Velocidades registradas por las trayectorias individuales de las boyas de deriva durante el periodo de octubre-noviembre-diciembre interpoladas mediante un Kriging.

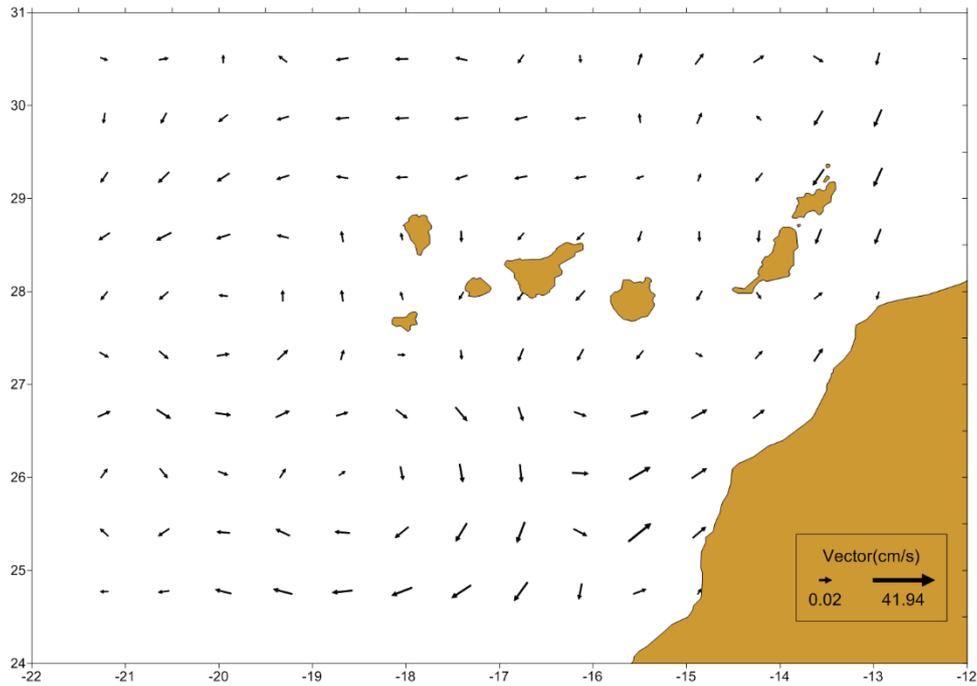


Figura 5.56. Mapa estacional (octubre-noviembre-diciembre) donde se representa el vector promedio de la velocidad para cada una de las cuadrículas de 1°x1° para el periodo 1998-2012.

Para el periodo que corresponde de octubre a diciembre se aprecia un descenso de la velocidad respecto al periodo anterior, con una velocidad media de 14,5 cm/s. Al norte del archipiélago se parecían velocidades medias de 12cm/s y una alta variabilidad en cuanto a la dirección, se observa una tendencia hacia el norte y hacia el oeste. En los canales entre las islas la velocidad media es de 14 cm/s y una tendencia predominante hacia el suroeste. Se aprecia al oeste de la isla de La Palma y de El Hierro una componente dirección norte y la presencia de una estructura ciclónica (28° norte y 20° oeste). Al suroeste de las islas las velocidades aumentan, apreciándose una estructura anticiclónica con velocidades medias en torno a 24,5 cm/s. También se observa al sur de las islas una corriente dirección norte cerca de la costa de África, donde se registra la máxima velocidad media de 41 cm/s (25.5°norte, 15.5° oeste).

5.3.2 Flujo medio de la corriente

Para todo el periodo de estudio (1998-2012) se obtiene el mapa vectorial del flujo medio con una resolución de $1^\circ \times 1^\circ$ (Figura 5.59). Asumiendo que el flujo dentro de cuadrícula es homogéneo y estacionario, el cálculo de la componente media es calculada como la velocidad media de todas las observaciones contenidas en cada cuadrícula, como se hizo para el estudio estacional.

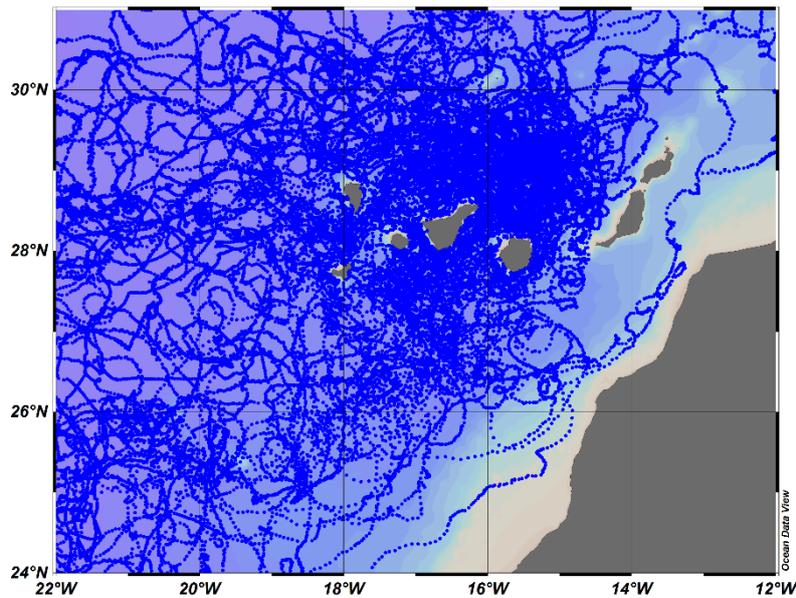


Figura 5.57. Trayectorias de todas las boyas de deriva para el periodo de estudio 1998-2012.

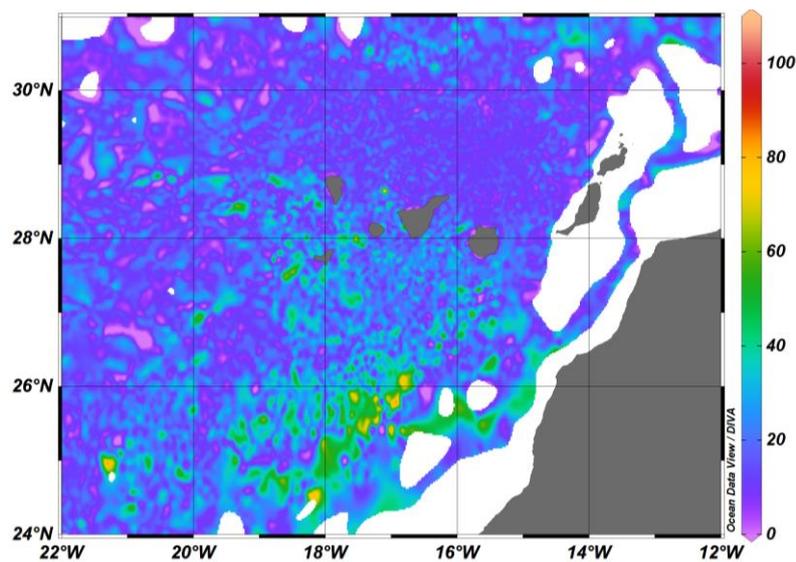


Figura 5.58. Velocidades registradas por las trayectorias individuales de las boyas de deriva para todo el periodo de estudio 1998-2012 interpoladas mediante un Kriging.

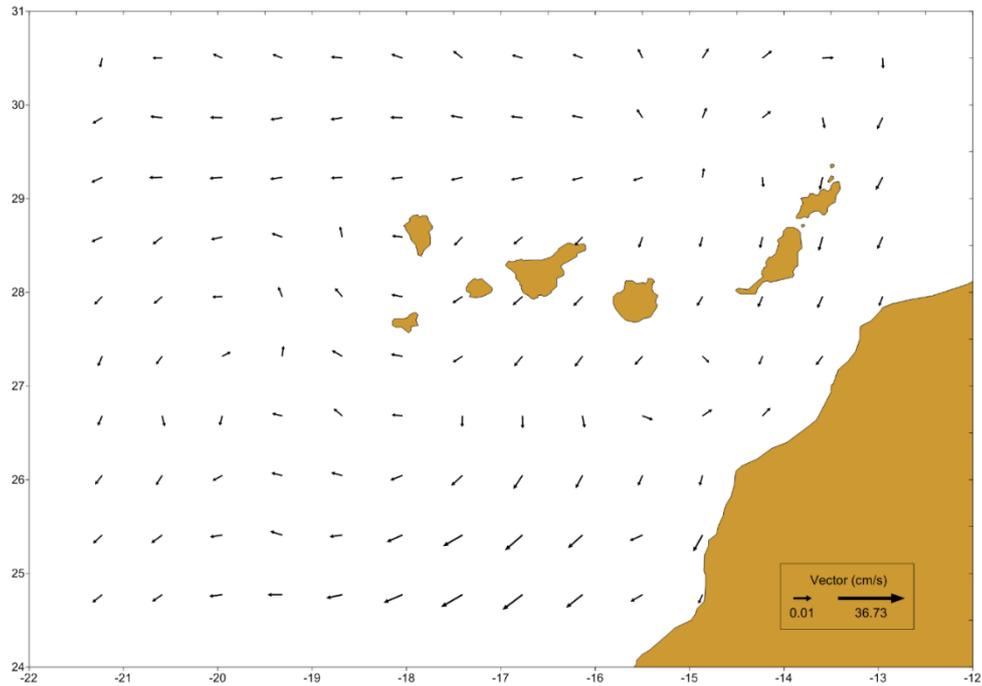


Figura 5.59. Mapa del flujo medio para todo el periodo de estudio, 1998-2012. Donde se representa el vector medio para cada una de las cuadrículas de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$.

La velocidad media para para el registro completo de datos (1998-2012) para el área de estudio es de 14 cm/s. Se observa una intensificación de la corriente en los canales y al suroeste de las islas. Al norte de las islas la velocidad promedio está en torno a los 12 cm/s, apreciándose una dirección predominante hacia el oeste a partir de los 16° oeste de longitud. Hay una tendencia en la dirección de la corriente hacia el norte y suroeste en la zona donde se despliegan las boyas de deriva (29° norte y 15° oeste). Entre los canales de las islas la velocidad media se intensifica en torno a los 20 cm/s. Los máximos valores medios se dan al suroeste de las islas alcanzando valores de 37 cm/s. Se observa la presencia de una estructura ciclónica al oeste de la isla de La Palma y El Hierro. También se aprecia en el mapa en torno a los 26.5° norte y 14.5° oeste la presencia de una corriente dirección norte cerca de la costa de África.

A continuación se presentan los mapas de la velocidad media y la desviación de la media para cada una de las cuadrículas de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$.

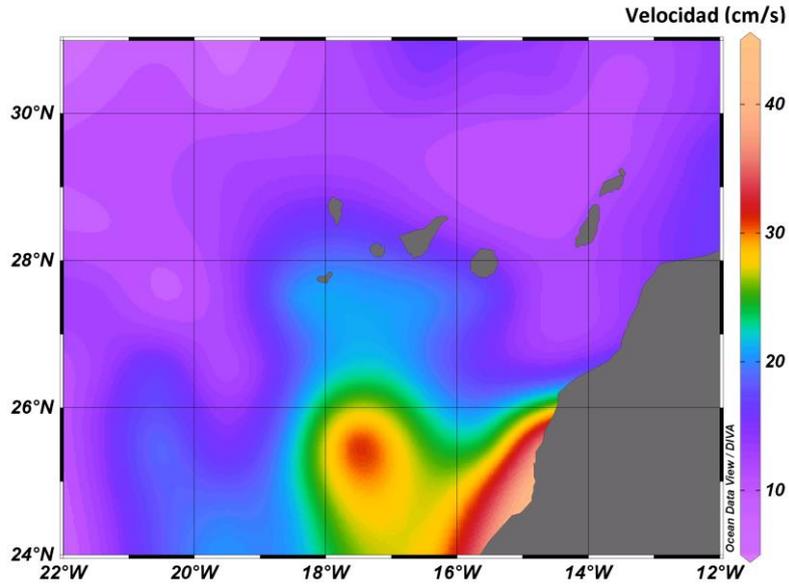


Figura 5.60. Velocidad media de la corriente para el periodo 1998-2012 para cada una de las cuadrículas de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ interpolado mediante un Kriging.

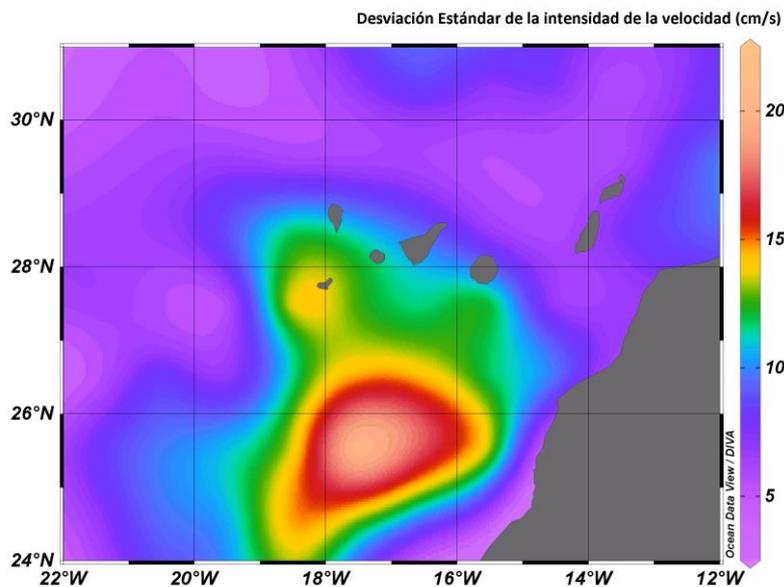


Figura 5.61. Desviación estándar de la velocidad media de la corriente para el periodo 1998-2012 para cada una de las cuadrículas de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ interpolado mediante un Kriging.

Las mayores velocidades se registran al suroeste de las islas y cerca de la costa de África, como se ha venido comentando en los resultados obtenidos de los mapas del flujo medio. Las mayores desviaciones de la media se dan al suroeste de las islas, lo que indica una marcada variabilidad de la corriente en esa zona, debido al efecto que producen las islas al paso de la corriente. Los canales de las islas también presentan una zona de gran variabilidad sobre todo en las islas más occidentales (entre La Palma, El Hierro y La Gomera). Estas regiones se corresponden con zonas de intensa actividad de mesoescala de tipo remolino.

Las máximas desviaciones de la media se corresponden con el mismo orden de magnitud que la de la velocidad media, indicándonos que los fenómenos mesoescalares en esas regiones tienen la misma importancia que el flujo medio. Estas zonas con altas desviaciones de la media son zonas más difícilmente de predecir debido a que son zonas de gran variabilidad y están relacionadas con la formación de fenómenos de mesoescala. En caso de que ocurriera algún tipo de incidente marítimo en estas regiones, habría que tenerlo en consideración a la hora de interpretar los resultados obtenidos de los modelos numéricos de predicción.

Ampliación de la serie de datos

Como complemento al estudio del flujo medio de la corriente se ha tomado la serie completa de boyas de deriva del Programa Global de Drifters. Además de las 130 boyas de deriva desplegadas, se han incluido todas las boyas que pasan por la zona de estudio y han sido desplegadas por otras instituciones. Este aumento en la serie de datos, ha permitido mejorar la resolución de las cuadrículas para el cálculo del flujo medio a $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$. Desde el comienzo del Programa Global de Drifters en 1979 se han puesto en el agua un total de 19.779 boyas de deriva en todos los océanos. En la Figura 5.62 se representa el número total de registros para la zona de estudio con una resolución de $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$. La mayor concentración del número de registros se encuentra en la zona donde se han desplegado las 130 boyas de deriva que comprenden este estudio de tesis, quedando demostrado la gran aportación que han supuesto estos lanzamientos al Programa Global de Drifters.

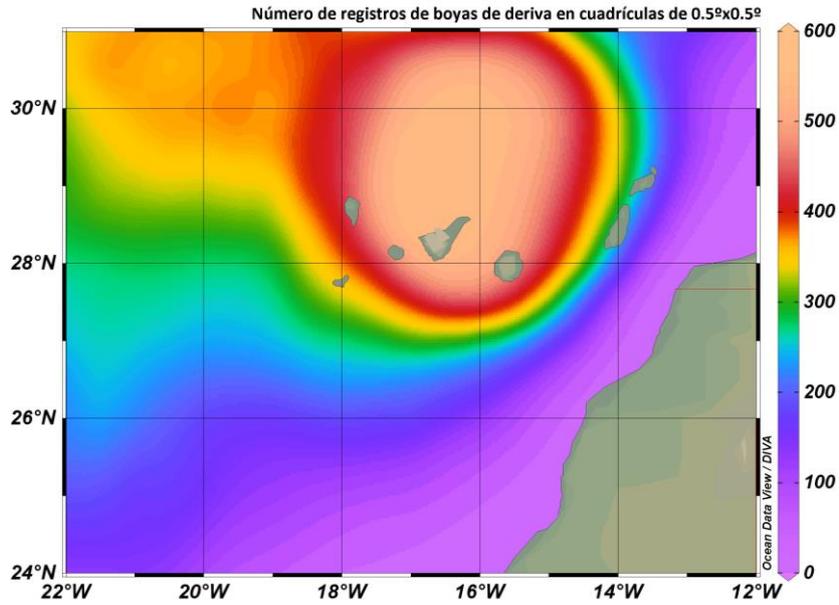


Figura 5.62. Número total de registros de boyas de deriva para el periodo 1979-2012 para una resolución de 0.5°x0.5°. Obtenido del Programa Global de Drifters.

La metodología para el cálculo del flujo medio de la corriente para la serie completa del Programa Global de Drifters ha sido desarrollada por Lumpkin y Johnson (2013). Los datos han sido promediados cada 5 días para quitar las fluctuaciones debido a los fenómenos de alta frecuencia como son las mareas y ondas inerciales y así obtener solo los fenómenos que forman parte de los cambios medios estacionales e interanuales. Los resultados se muestran en la Figura 5.63.

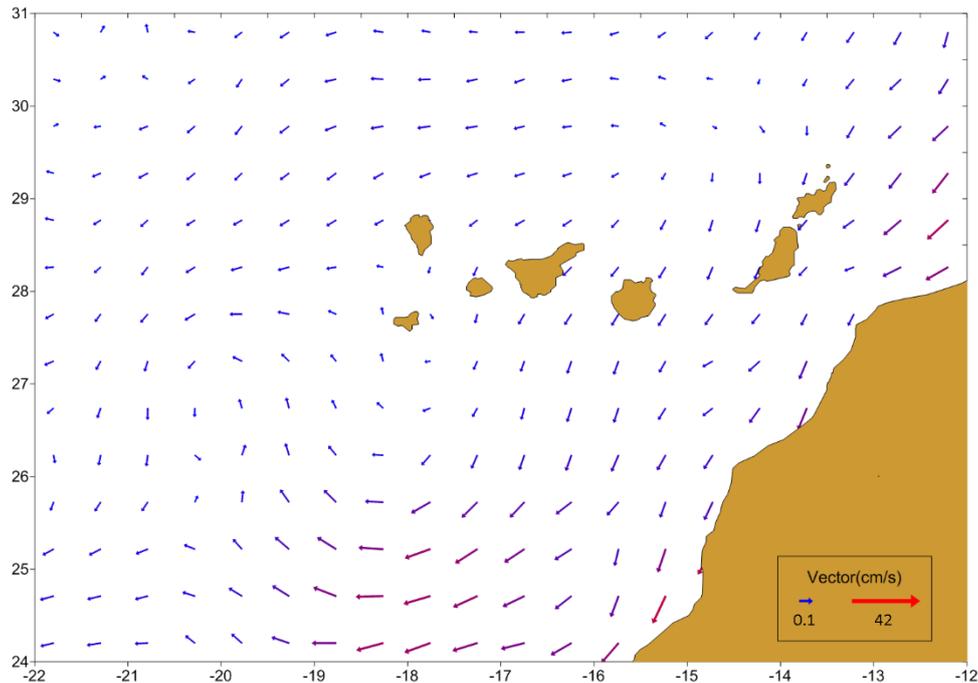


Figura 5.63. Mapa del flujo medio de la corriente con una resolución de $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ para el periodo 1979-2012. Obtenido del Programa Global de Drifters.

El mapa del flujo medio obtenido para el registro completo de datos del Programa Global de Drifters, se corresponde bastante con el mapa del flujo medio obtenido de las 130 boyas de deriva estudiadas. Se aprecia la tendencia dirección oeste al norte de las islas, a partir de los 16° de longitud. Se observa la tendencia hacia el suroeste en los canales y al sur de las islas. Observamos también la formación de una estructura ciclónica al suroeste de la isla de El Hierro (26.5° norte y 20° oeste). Las velocidades medias registradas al norte de las islas están en torno a los 12cm/s , aumentando en los canales con velocidades medias de 18cm/s y alcanzando las máximas velocidades medias al suroeste de las islas en torno a los 40cm/s . En la siguiente figura (Figura 5.64) se muestra el mapa de la intensidad media de la velocidad para el registro completo de datos, para cada una de las cuadrículas de 0.5×0.5 . Se observa que las máximas velocidades se registran al suroeste de las islas y al este del archipiélago, cerca de la costa de África. Estas máximas velocidades (en torno a la latitud 29° norte y 12° oeste), no fueron registradas en el estudio de las 130 boyas de deriva, debido a que no había suficientes boyas en esa zona cerca de la costa de África. Al completar la serie de datos con el registro completo del Programa Global de Drifters, se ha cubierto la zona en aquellas regiones con pocos registros de datos.

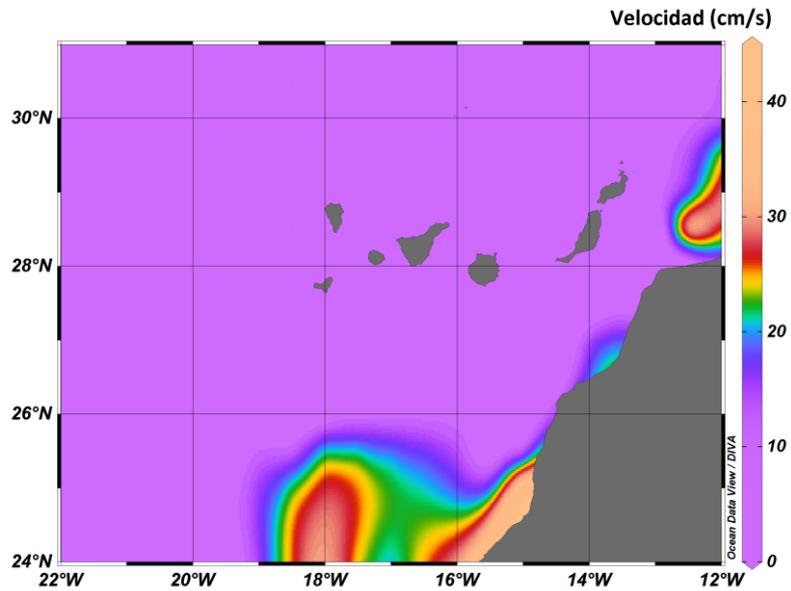


Figura 5.64. Velocidad media de la corriente para el periodo 1979-2012. Obtenido del Programa Global de Drifters.

Al sur de las islas es donde también se dan las máximas desviaciones del flujo medio (Figura 5.65) relacionado con la formación de fenómenos de mesoescala, estos fenómenos pueden ser identificados mediante la energía cinética de eddy (EKE). A continuación se muestra la distribución de EKE para el registro completo del Programa Global de Drifters (Lumpkin y Johnson, 2013).

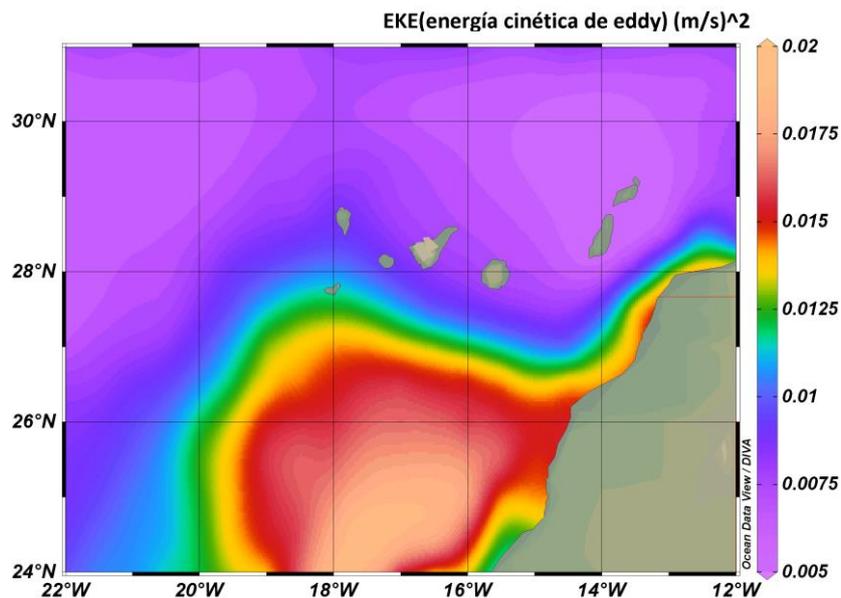


Figura 5.65. Energía cinética de Eddy para el periodo 1979-2012. Obtenida del Programa Global de Drifters.

Los resultados del flujo medio de la corriente superficial obtenidos por Lumpkin y Johnson (2013) presentan un suavizado debido a los promedios a los que son sometidos los datos. Por lo que algunos de los fenómenos que hemos apreciado en el estudio de las 130 boyas (sin promediar) no son identificados en este caso. En base a ambos resultados, podemos determinar que la metodología de Lumpkin y Johnson (2013) es óptima para el estudio de fenómenos a gran escala, como son los fenómenos interanuales y los estudios que relacionan la corriente superficial con los fenómenos de La Oscilación del Atlántico Norte (NAO) o El fenómeno de la Oscilación del Sur (ENSO).

Pero tenemos que tener en cuenta, que el planteamiento final de este trabajo es que los datos obtenidos sirvan de apoyo a las instituciones de salvamento en caso de incidentes marítimos. Los resultados del flujo medio de las 130 boyas de deriva sin promediar, resultan ser más útiles para estos casos, debido a que éstos tienen en consideración fenómenos de menor escala temporal. El periodo de actuación en los casos de emergencias marítimas va de horas a pocos días, además también es necesario tener en cuenta los fenómenos de alta frecuencia debido al efecto que estos producen en los objetos que se encuentran a la deriva, sobre todo a medida que estos se acercan a costa. Con todo esto podemos concluir que ambos estudios pueden ser complementarios en base a los requerimientos de cada caso.

5.4. Correlación boya-viento-geostrofia

Para el estudio comparativo de los datos de las boyas con el campo de la corriente geostrófica y el campo de viento se seleccionó el periodo comprendido entre los años 2002-2005 y se analizándose un total de 37 boyas de deriva coincidentes con ese periodo. Para todas las boyas analizadas se extrajo mediante el sistema de monitorización-SIMOM, los datos de viento superficial y de la corriente geostrófica coincidentes en el tiempo (ver 3.2).

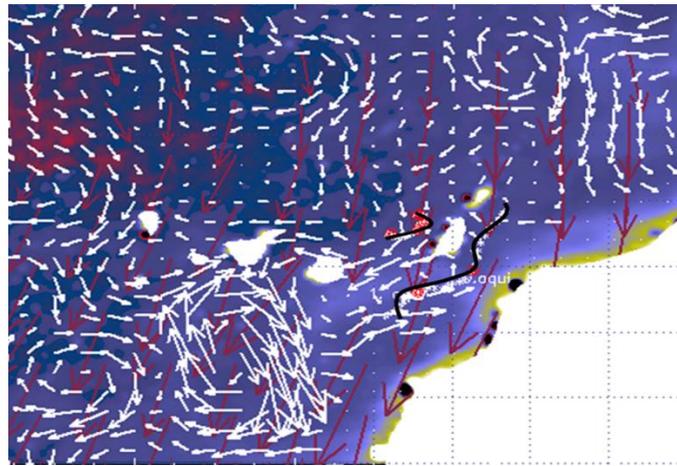


Figura 5.66. Imagen integrada de viento (vector rojo), corriente geostrófica (vector blanco) y boyas de deriva (línea negra) obtenida de SIMOM para el 03/08/2004.

Tras la obtención de las series de datos se realizó un análisis comparativo de las tres variables (boya-viento-geostrofia). El análisis comparativo consistió en evaluar las correlaciones entre la velocidad del viento y de la corriente geostrófica con las respectivas velocidades de las boyas. Previo al estudio comparativo los datos de las boyas fueron homogeneizados mediante promedios diarios y semanales, dado que la resolución temporal es diferente para cada uno de los parámetros. La resolución varía desde horas para el caso de las boyas, a días para el caso de los vientos y semanas para el caso de las corrientes.

Para todas las boyas analizadas se observa que existe una mejor correlación de la velocidad boya con la velocidad geostrófica (considerando una relación lineal entre varias variables). Esto cumple con las especificaciones establecidas por los fabricantes de estos dispositivos, de que sean buenos rastreadores de la corriente superficial y que por sus características de diseño minimicen el efecto del viento. A continuación se muestran unas gráficas comparativas de la velocidad zonal y meridional de la boya, con la velocidad del viento y la corriente geostrofia para uno de los casos estudiados, que se corresponde con la boya de deriva 30316.

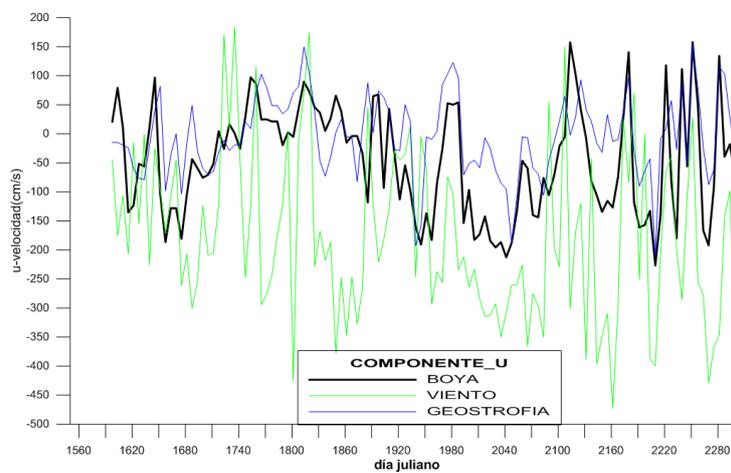


Figura 5.67. Velocidad zonal de la boya 30316 junto con la velocidad del viento y la velocidad geostrofia.

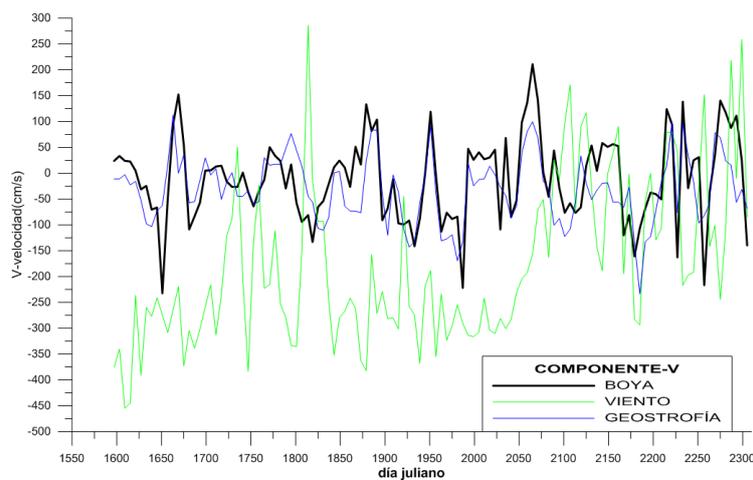


Figura 5.68. Velocidad meridional de la boya 30316 junto con la velocidad del viento y velocidad geostrofia.

Para todas las boyas analizadas se obtiene un coeficiente de correlación entre la velocidad de la boya y la velocidad de la corriente geostrófica que varía desde $r=0.30$ a $r=0.57$, con un nivel de significación del 99,9%. Para todos los casos estudiados la componente zonal de la corriente geostrófica presenta una mayor correlación que la componente meridional. Esto concuerda con la bibliografía existente.

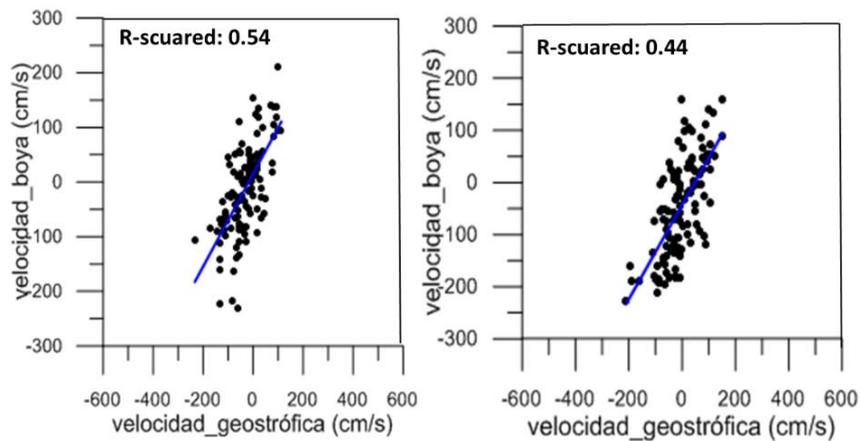


Figura 5.69. Correlación de la velocidad de la boya 30316 con la velocidad de la corriente geostrófica para la componente zonal (izquierda) y meridional (derecha).

Del análisis de todas las boyas se obtiene la siguiente ecuación promedio, para la relación de la boya y la corriente geostrófica para la componente zonal y meridional:

$$U_{boya} = 0.9 * U_{geos} + /- U_{Residuos}; \quad (r-squared=0.5) \quad (ec. 5.1)$$

$$V_{boya} = 0.5 * V_{geos} + /- V_{Residuos}; \quad (r-squared=0.3) \quad (ec. 5.2)$$

Ishikawa et al. (1995) compararon las velocidades superficiales obtenidas de medidas de altimetría con las obtenidas de boyas de deriva y encontraron coeficientes de correlación entre ambas de 0.56 y 0.48 para la componente zonal y meridional respectivamente. Kelly et al. (1998) encontraron correlaciones entre la velocidad de la corriente geostrófica y la velocidad de la boya de $r= 0.73$ y por su parte Lee et al. (2001) en sus estudios encontraron coeficientes de correlación entre la corriente geostrófica y las boyas de $r=0.5$.

Como se ha comentado (ver 1.3) la velocidad de los objetos que se encuentran a la deriva se puede considerar una combinación de una componente geostrófica más una componente ageostrófica. La parte geostrófica la estamos midiendo directamente con los datos de altimetría, la parte ageostrófica la estamos considerando de un modo indirecto con el viento medido a 10 metros de la superficie del mar. Las diferencias encontradas entre la corriente seguida por la boya y la corriente geostrófica son debidas a la componente ageostrófica del viento (Ralph y Niiler, 1999).

Tras el análisis de la correlación de las variables por separado, se realizó un posterior análisis de regresión lineal múltiple mediante el software SPSS. Basándonos en las relaciones descritas entre las tres variables, la velocidad de la boya será considerada como la suma de la velocidad de la corriente geostrófica más la velocidad del viento ponderado por unos coeficientes (a , b), más un término denominado residuos, donde incluimos otros fenómenos que no podemos medir directamente.

$$V_{\text{boya}} = aV_{\text{geostrófica}} + bV_{\text{viento}} + \text{Residuos} \quad (5.3)$$

Tras el análisis de regresión lineal múltiple de las tres variables analizadas, obtenemos los valores de los coeficientes (a , b) de la ecuación 5.3. Con este tipo de relación lineal entre las variables se explica el 77% de los casos. Obteniéndose un mayor peso de la componente geostrófica respecto a la componente del viento como era de esperar. El resultado del análisis de regresión se presenta en la siguiente ecuación:

$$V_{\text{boya}} = 0.65 V_{\text{geostrófica}} + 0.12V_{\text{viento}} + \text{Residuos} \quad (5.4)$$

Ralph y Niiler (1999) en sus estudios encontraron valores muy similares, obtuvieron que el 63% del movimiento de la boya se explica por el campo geostrófico y que el viento aporta un 15% al movimiento de la boya.

5.5. Valoración de los modelos numéricos

Como se describió en el correspondiente apartado de material y métodos durante el desarrollo de esta tesis se ha trabajado con dos modelos numéricos de predicción (ver 3.3), con el propósito de obtener la trayectoria más probable de un objeto que se encuentra a la deriva. Para valorar los resultados obtenidos por ambos modelos, se han realizado varios ejercicios en los que se comparan los resultados obtenidos de las simulaciones numéricas con la trayectoria real de las boyas de deriva. Esto nos ha permitido evaluar el grado de acierto de los modelos y mejorar los resultados adaptados a esta zona, que es difícil de predecir debido a la gran variabilidad de la corriente y a los numerosos fenómenos de mesoescala que se suceden. A continuación se presentan algunos de los ejemplos realizados para ambos modelos.

5.5.1 Modelo de LAMTec

Para evaluar los resultados obtenidos del modelo desarrollado por LAMTec (Laboratorio de Ambiente Marino y Tecnología, de la Universidad de Azores), se realizaron simulaciones en los días en los que se había lanzado una boya a la deriva en la estación ESTOC (29°10' norte y 15°30' oeste). Para la inicialización del modelo se recopilaron previamente los datos de viento y de corriente para el correspondiente periodo de estudio. Una vez definidas las condiciones iniciales y definido el punto de origen (punto donde se lanzan las boyas) se procede a ejecutar el modelo de transporte que calcula la trayectoria más probable para las condiciones iniciales introducidas. Tras obtener los resultados del modelo estos se comparan con la trayectoria de la boya en cada caso. A continuación se muestran los resultados de algunos de los ejercicios realizados.

Simulación del 22 de marzo del 2003

El 22 de marzo de 2003 se desplegó la boya 39196. Para ese periodo se realizó una simulación de 12 días y posteriormente se compararon los resultados obtenidos con los primeros 12 días de trayectoria de la boya. Ambas trayectorias se muestran a continuación.

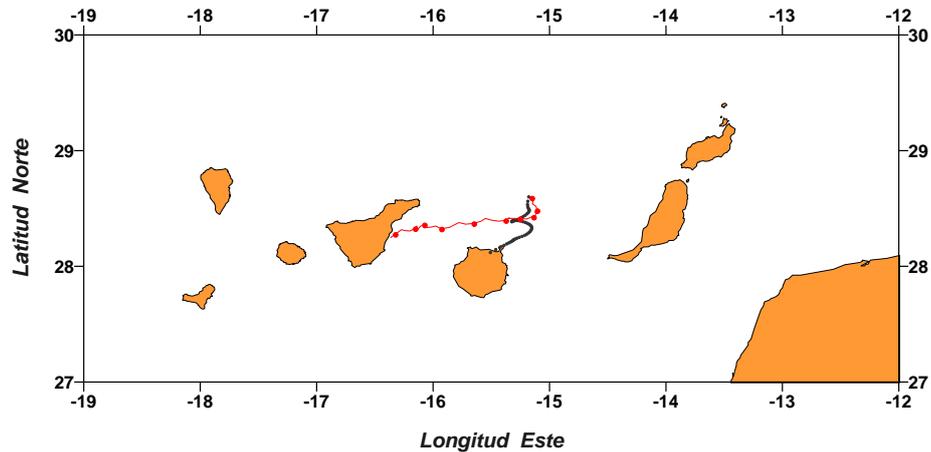


Figura 5.70. Trayectoria obtenida del modelo (gris) y de la boya a la deriva (rojo) para el ejercicio del 12/03/2003.

En este caso podemos observar cómo la trayectoria inicial obtenida por el modelo sigue la misma tendencia que la trayectoria seguida por boya. Es a partir del sexto día cuando las trayectorias se separan. A partir de ese instante la boya toma una dirección oeste y finalmente impacta en la costa este de la isla de Tenerife. La simulación predice una trayectoria dirección sur y termina impactando en la costa norte de Gran Canaria. En la siguiente gráfica podemos ver las trayectorias más en detalle.

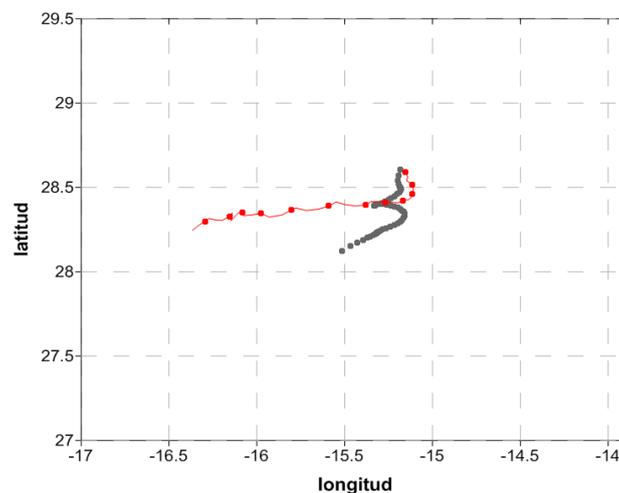


Figura 5.71. Zoom de la trayectoria obtenida del modelo (gris) y de la boya a la deriva (rojo) para el ejercicio del 12/03/2003.

Simulación del día 6 de abril de 2003

El 6 de abril de 2003 se desplegó la boya 39195. Para ese periodo se realizó una simulación de 5 días y posteriormente se compararon los resultados obtenidos con los primeros 5 días de trayectoria de la boya. Ambas trayectorias se muestran a continuación.

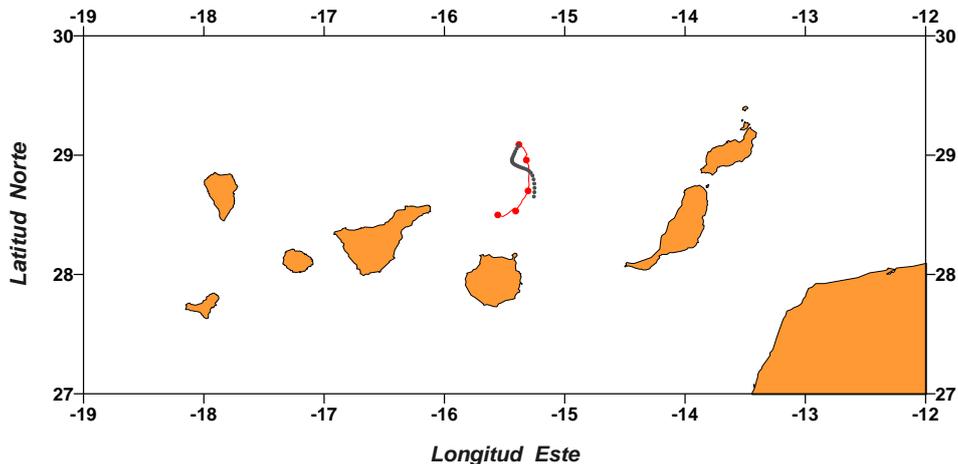


Figura 5.72. Trayectoria obtenida del modelo (gris) y de la boya a la deriva (rojo) para el ejercicio del 06/04/2003.

Observamos como ambas trayectorias van inicialmente hacia el sur. En este caso la trayectoria seguida por la boya recorre una mayor distancia que la trayectoria obtenida por el modelo para los 5 días de simulación. La boya se desplaza 20 kilómetros al suroeste respecto a la última posición obtenida por el modelo.

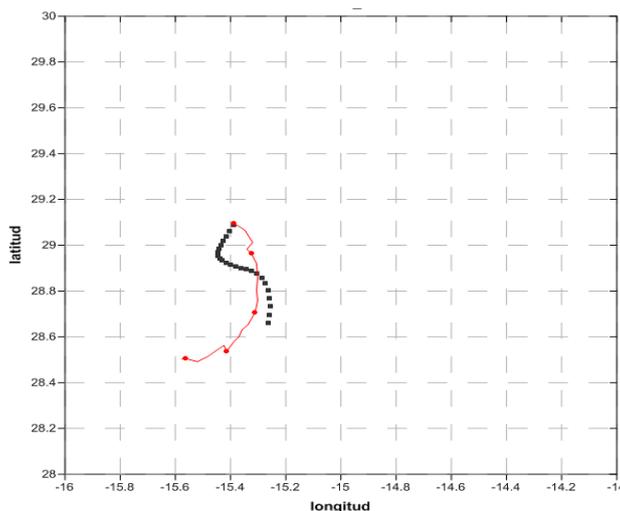


Figura 5.73. Zoom de la trayectoria obtenida del modelo (gris) y de la boya a la deriva (rojo) para el ejercicio del 06/04/2003.

Simulación del 13 de junio 2003

El 13 de junio de 2003 se desplegó la boya 39193. Para ese periodo se realizó una simulación de 5 días y posteriormente se compararon los resultados obtenidos con los primeros 5 días de trayectoria de la boya. Ambas trayectorias se muestran a continuación.

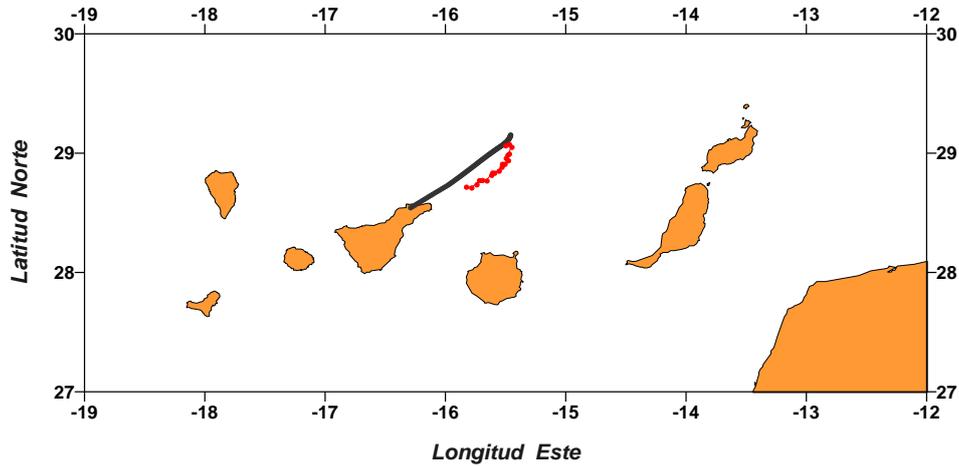


Figura 5.74. Trayectoria obtenida del modelo (gris) y de la boya a la deriva (rojo) para el ejercicio del 13/06/2003.

La tendencia de la trayectoria para ambos casos es dirección suroeste. En este caso la trayectoria obtenida por el modelo recorre una mayor distancia que la trayectoria real de la boya para los 5 días de simulación. La trayectoria obtenida de la simulación recorre 60 kilómetros dirección suroeste respecto a la última posición de la boya, impactando con la costa norte de la isla de Tenerife.

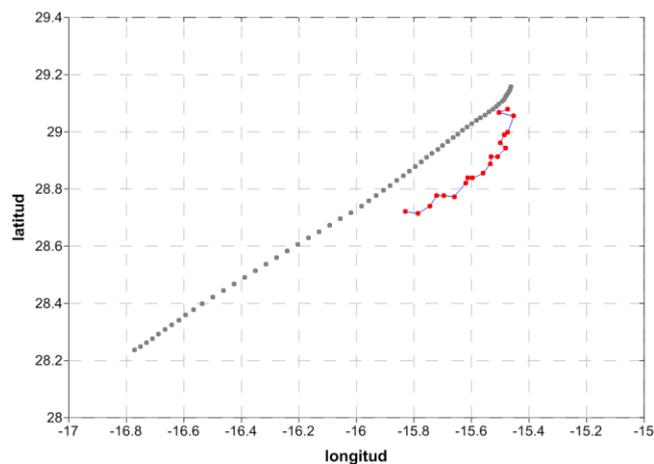


Figura 5.75. Zoom de trayectoria obtenida del modelo (gris) y de la boya a la deriva (rojo) para el ejercicio del 13/06/2003.

En general, para los tres casos que se han descrito, se puede considerar que el modelo presenta un buen ajuste para el seguimiento de la corriente superficial para las primeras 72 horas, a partir de ese instante la simulación empieza a alejarse de la situación real. En todos los casos la trayectoria inicial del modelo y de la boya coinciden en la dirección inicial. La distancia encontrada entre la trayectoria real y la simulada por el modelo (exceptuando en el caso de junio), se encuentra dentro del rango de actuación por parte de las instituciones de búsqueda y salvamento, por lo que se puede considerar una buena primera aproximación.

Por los tres ejercicios que se realizaron los meses de enero, julio y agosto de 2003, los resultados no fueron tan óptimos. En estos tres casos las boyas se quedan retenidas por alguna estructura de mesoescala, que hace que la boya no se desplazase durante un tiempo. Este fenómeno no fue detectado por el modelo para ninguno de los tres casos. A continuación se presentan las trayectorias obtenidas para esas tres simulaciones correspondientes al 30 de enero, el 16 de julio y el 2 de agosto. Las simulaciones realizadas durante esos tres periodos dan como resultado una trayectoria que recorre grandes distancias en dirección suroeste y en dos de los casos llega a alcanzar la costa de Tenerife.

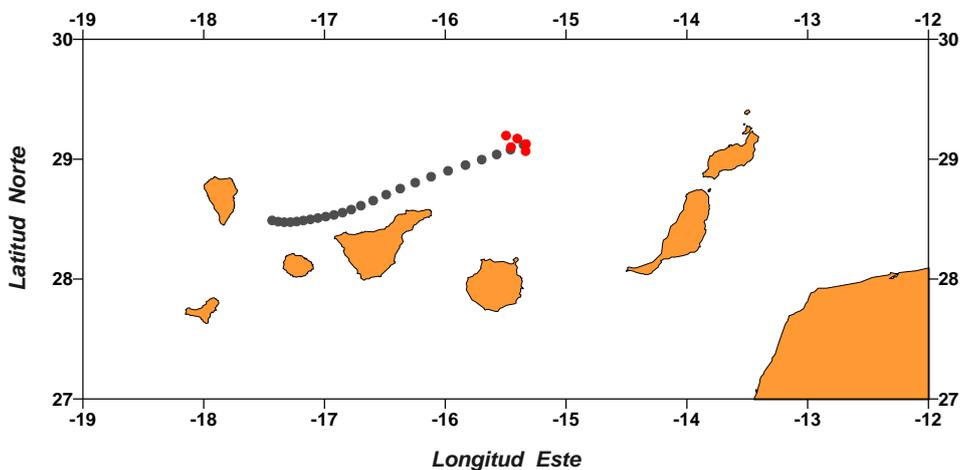


Figura 5.76. Trayectoria obtenida del modelo (gris) y de la boya a la deriva (rojo) para el ejercicio del 30/01/2003.

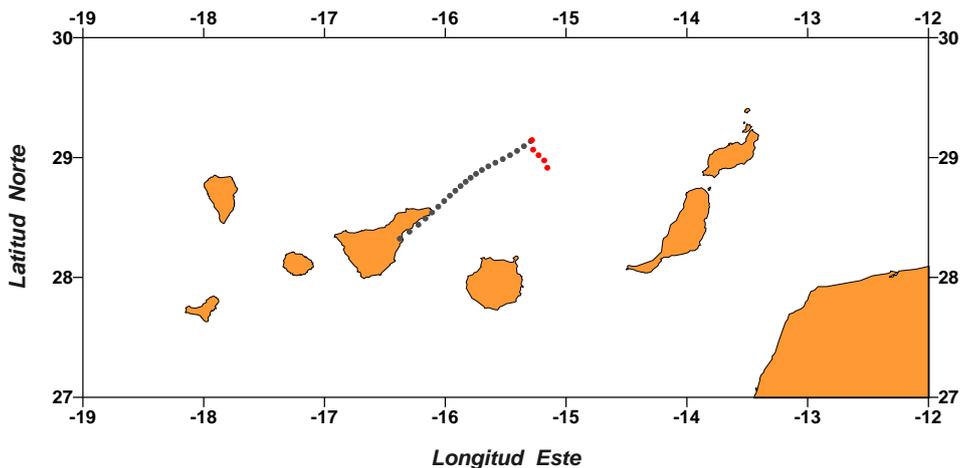


Figura 5.77. Trayectoria obtenida del modelo (gris) y de la boya a la deriva (rojo) para el ejercicio del 16/07/2003.

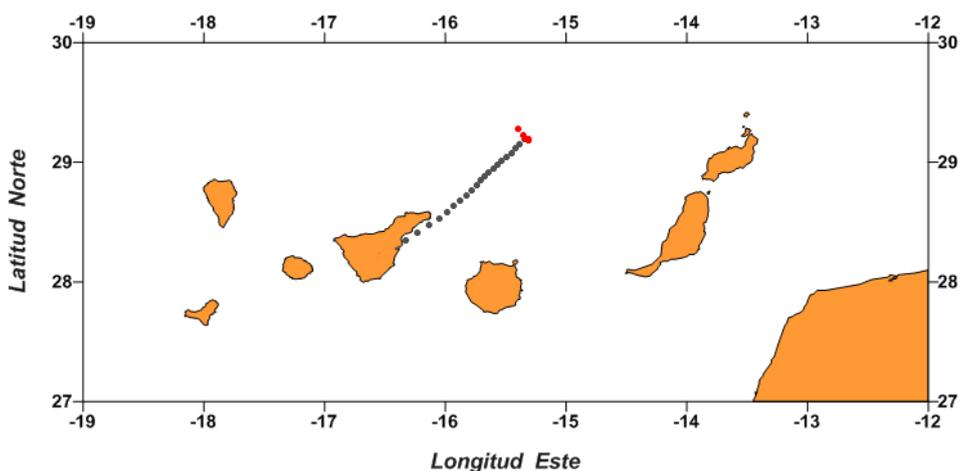


Figura 5.78. Trayectoria obtenida del modelo (gris) y de la boya a la deriva (rojo) para el ejercicio del 02/08/2003.

El hecho de que el modelo no haya identificado las estructuras mesoescalares identificadas por las boyas es un problema que presenta este modelo. Es importante que la resolución del modelo, así como la resolución de los datos de los que se alimenta el modelo sean óptimas para identificar los fenómenos característicos del área de estudio. Esta zona presenta una marcada variabilidad, con fenómenos en diferentes escalas espaciales y temporales, por lo que se requiere que los modelos usados puedan llegar a predecir estas situaciones para que se puedan considerar óptimos para esta zona.

5.5.2 Modelo MyOcean

En colaboración con el departamento de Área del Medio Físico de Puertos del Estado, se ha realizado un estudio comparativo de los resultados de predicción de corrientes obtenidos del modelo de MyOcean, con datos de boyas de deriva desplegadas en esa zona (ver 3.3.2). El periodo seleccionado para realizar estos estudios fue de abril a diciembre de 2011. MyOcean ofrece los resultados de la predicción en diferentes resoluciones espacio-temporales. La zona que cubre el modelo es la denominada zona IBI (Iberia, Bizkaia, Irlanda). Con respecto a la escala temporal los resultados pueden ser obtenidos en dos resoluciones diferentes. Una resolución horaria, en la que solo se obtienen resultados de la simulación para la capa superficial del océano. Y una resolución diaria en la que se obtienen resultados de la simulación para diferentes niveles de profundidad, que van desde la superficie hasta los 3.000 metros de profundidad. El estudio comparativo del modelo se realizó para las dos resoluciones temporales, tanto horaria como diaria. A continuación se muestra un mapa donde se pueden ver la zona IBI que cubre el modelo MyOcean, donde están representadas las trayectorias de las boyas de deriva que se encontraban dentro de la zona para el periodo de estudio (de abril a diciembre de 2011).

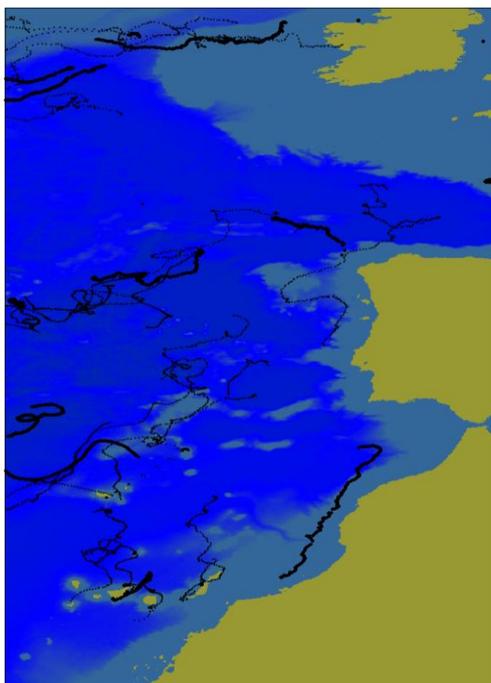


Figura 5.79. Mapa de la zona IBI para el modelo MyOcean, donde se presentan las trayectorias de las boyas de deriva para el periodo de abril a diciembre de 2011.

A continuación se muestran dos ejemplos de los estudios realizados, uno corresponde a abril de 2011 en la zona de canarias y otro a mayo de 2011 al norte de la zona IBI.

Simulación abril de 2011

Para la simulación de abril de 2011 se seleccionó una boya que se encontraba cerca de la costa oeste de las islas de Lanzarote y Fuerteventura identificada como 71843. La trayectoria se muestra en la siguiente gráfica.

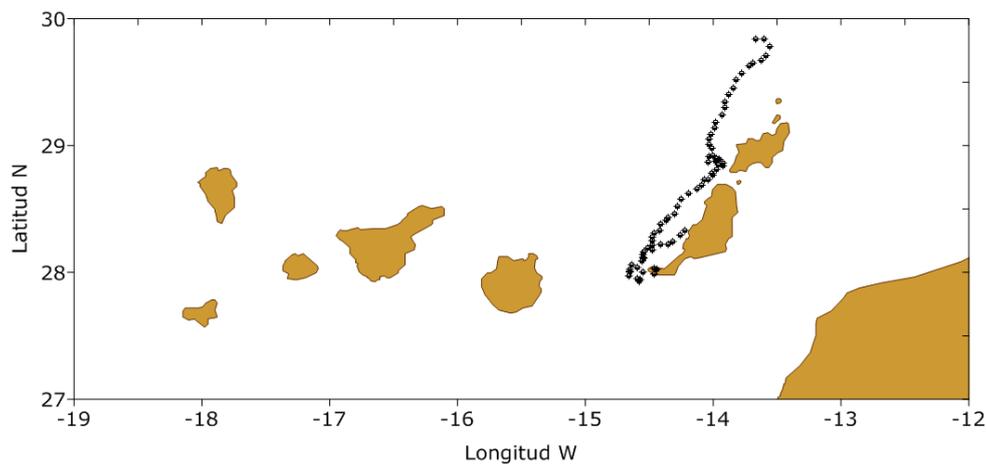


Figura 5.80. Trayectoria de la boya de deriva 71843.

Siguiendo con la metodología (ver 3.3.2), se obtiene del modelo MyOcean los datos de la previsión de la corriente para las dos resoluciones que ofrece el modelo (horaria y diaria) para el periodo correspondiente con la trayectoria de la boya seleccionada. La boya 71843 tiene un periodo del 01/04/2011 al 19/04/2011. Las velocidades registradas por la trayectoria de la boya de deriva y la trayectoria “virtual” obtenida de la predicción del modelo son comparadas en intensidad y dirección. Los resultados se muestran a continuación.

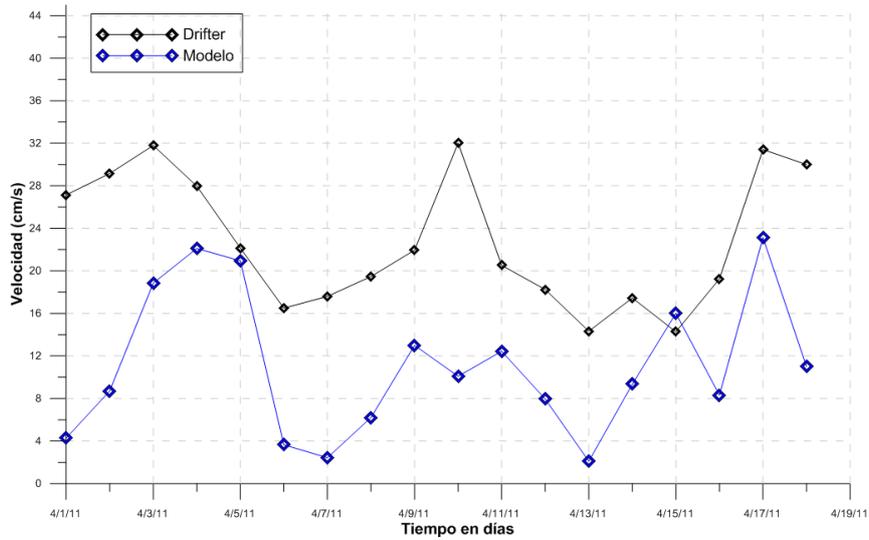


Figura 5.81. Intensidad de la velocidad obtenida por el modelo (azul) y por la boya 71843 (negro)

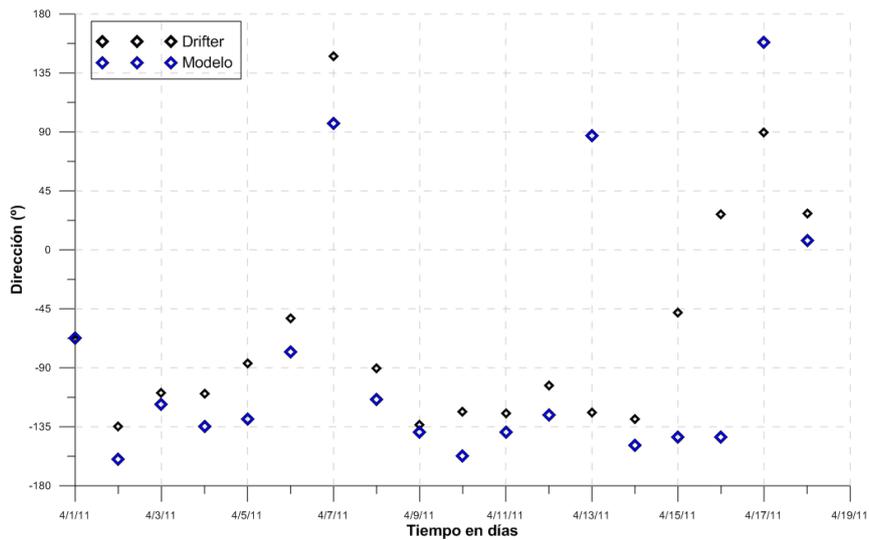


Figura 5.82. Dirección de vector de velocidad obtenida por el modelo (azul) y por la boya 71843 (negro)

Para el periodo seleccionado (01/04/2011 al 19/04/2011) la boya de deriva registró una velocidad media de 23 cm/s, alcanzando una velocidad máxima de 43 cm/s. Los resultados obtenidos del modelo MyOcean para las dos resoluciones temporales (horaria y diaria) se presentan a continuación.

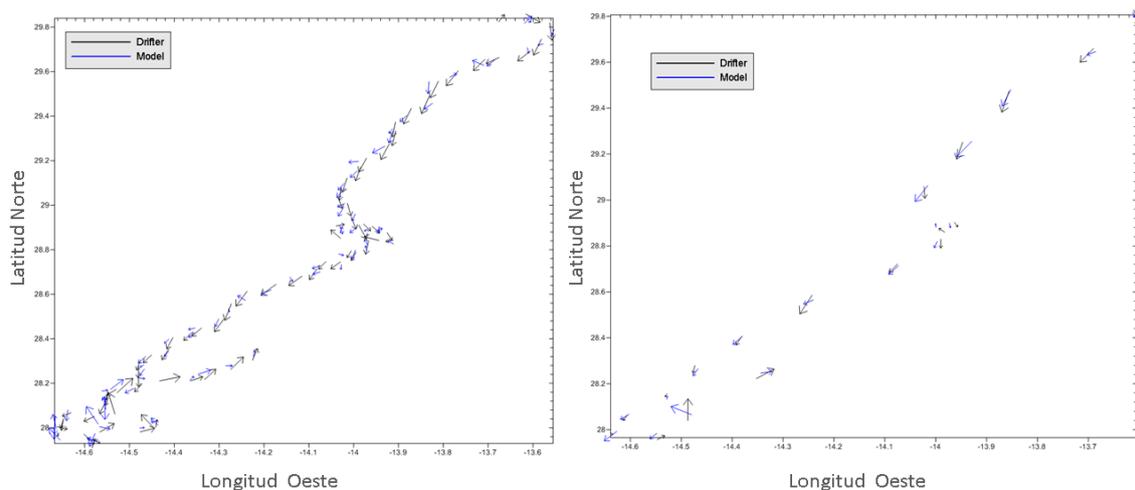


Figura 5.83. Representación gráfica del vector de corriente obtenido de la boya de deriva 71843 (negro) y por el modelo (azul). Para la resolución horaria (izquierda) y para la resolución diaria (derecha).

Los resultados obtenidos del modelo para la resolución horaria (un solo nivel superficial) registran una velocidad media en torno a 19 cm/s alcanzando una velocidad máxima de hasta 63 cm/s. Para los resultados de resolución diaria (varios niveles de profundidad) se tomaron los primeros 11 niveles del modelo que corresponden a una profundidad integrada de 15 metros. La velocidad media obtenida por el modelo para esta resolución fue de 11 cm/s registrándose una velocidad máxima de 23 cm/s.

	Velocidad (cm/s)			
	max.	min.	med.	desv.Std.
Boya 71843	42,95	1,25	22,83	8,5
Modelo resolución horaria	63,11	0,41	18,85	12,8
Modelo resolución diaria	23,11	2,11	11,14	6,7

Tabla 5.4. Estadísticas de la velocidad obtenidos por el modelo MyOcean y por la boya 71843.

Simulación de mayo-junio de 2011

Para este ejercicio se seleccionó una boya al norte de la zona IBI, con el objetivo de cubrir toda la región en la que opera del modelo. La boya seleccionada fue la boya 92905 durante el periodo del 21/05/2011 al 30/06/2011. En la siguiente figura se muestra la trayectoria de la boya seleccionada.

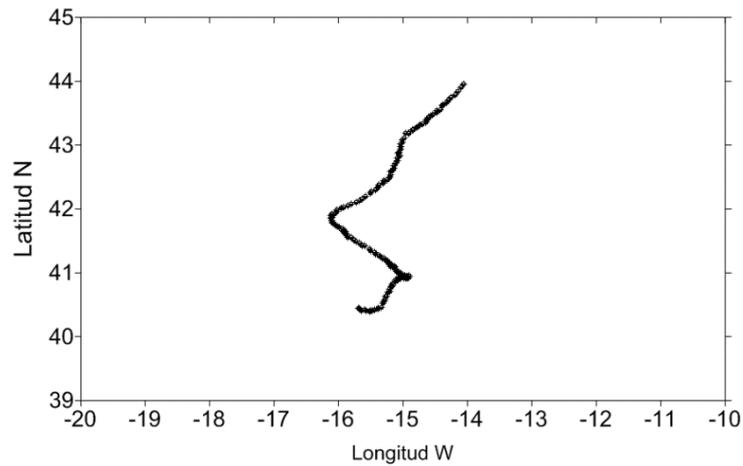


Figura 5.84. Trayectoria de la boya de deriva 92905, al norte del a zona IBI.

Las velocidades registradas por la trayectoria real de la boya de deriva y la trayectoria “virtual” obtenida de la predicción del modelo son comparadas en intensidad y dirección.

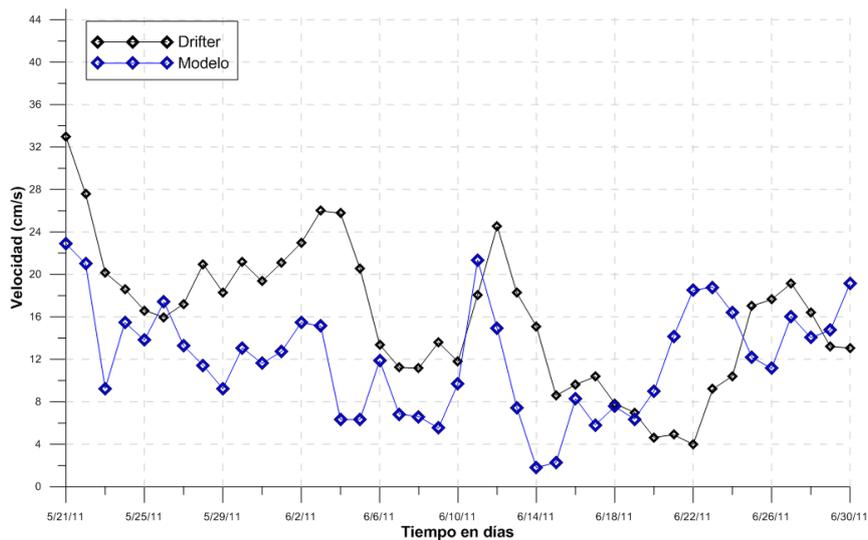


Figura 5.85. Intensidad de la velocidad obtenida por el modelo (azul) y por la boya 92905 (negro)

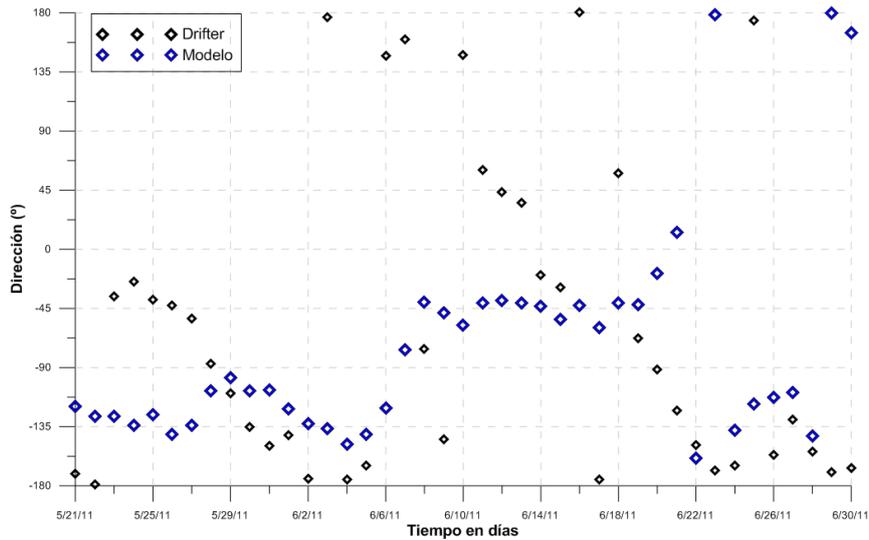


Figura 5.86. Dirección de vector de velocidad obtenida por el modelo (azul) y por la boya 92905 (negro)

Para el periodo seleccionado (21/05/2011 al 30/06/2011) la boya de deriva registró una velocidad media en torno a los 16 cm/s alcanzando una velocidad máxima de 35 cm/s. Los resultados obtenidos del modelo MyOcean para las dos resoluciones temporales (horaria y diaria) se presentan a continuación.

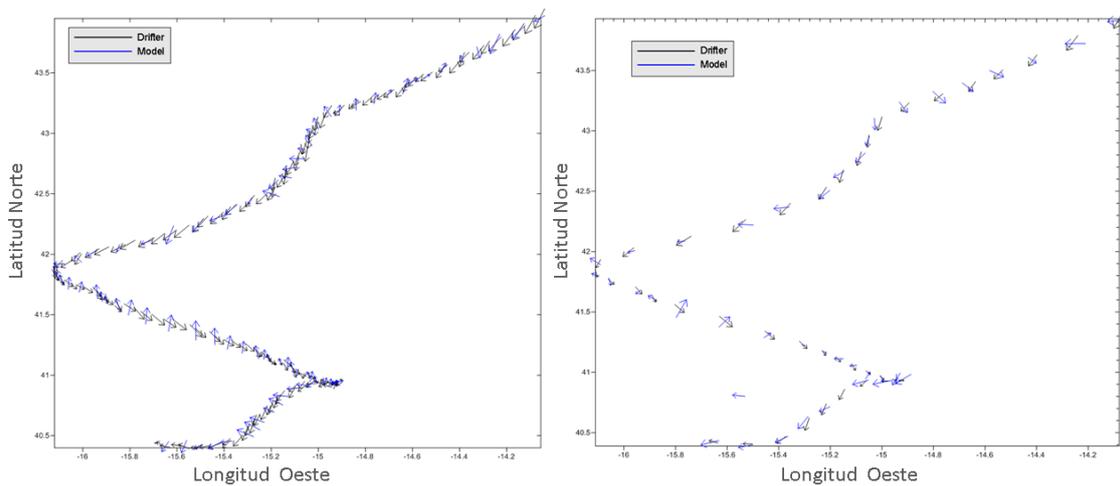


Figura 5.87. Representación gráfica del vector de corriente obtenido de la boya de deriva 92905 (negro) y por el modelo (azul). Para la resolución horaria (izquierda) y para la resolución diaria (derecha).

Los resultados obtenidos del modelo para la resolución horaria (un solo nivel superficial) registran una velocidad media en torno a los 15 cm/s alcanzando una velocidad máxima de hasta 30 cm/s. Para los resultados de resolución diaria (varios niveles de profundidad) la velocidad media obtenida por el modelo fue de 12 cm/s registrándose una velocidad máxima de 23 cm/s.

	Velocidad (cm/s)			
	max.	min.	med.	desv.Std.
Boya 92905	34,96	0,34	15,90	6,9
Modelo resolución horaria	29,92	1,43	14,94	6,2
Modelo resolución diaria	22,88	1,80	12,07	5,2

Tabla 5.5. Estadísticas de la velocidad obtenidos por el modelo MyOcean y por la boya 92905.

En base a los resultados obtenidos, se puede determinar que los resultados del modelo con menor resolución temporal (resultados diarios), aunque tienen en cuenta diferentes niveles de profundidad (hasta los 15 metros), subestima los datos de la corriente medidos por las boyas. Para la resolución horaria (solo se obtienen datos de la capa superficial) los resultados se ajustan bastante mejor a los resultados de la boya.

Teniendo en cuenta el objetivo que se plantea en este trabajo, que los resultados puedan servir de apoyo en caso de incidente marítimo a las instituciones de salvamento, se puede considerar que la resolución horaria para la capa superficial del océano que ofrece MyOcean es una buena aproximación. Como ya se ha comentado, en los casos de incidentes marítimos el tiempo de respuesta va de horas a pocos días por lo que la resolución horaria del modelo es óptima para ese tipo de aplicaciones. En caso de otro tipo de incidentes, que impliquen por ejemplo el hundimiento de grandes objetos, se podría contemplar la posibilidad de usar los datos de resolución diaria ya que permiten obtener predicciones de la corriente a mayores profundidades.

6. APLICACIONES

6. APLICACIONES

Canarias por su condición de insularidad depende de las condiciones marítimas que se den en la región del Atlántico Norte, donde no siempre se dan las condiciones más favorables para la navegación. Por el archipiélago pasan algunas de las rutas de transporte marítimo más concurridas del mundo, lo que conlleva que puedan producirse accidentes como son los derrames accidentales de hidrocarburos, naufragios o la pérdida de material.

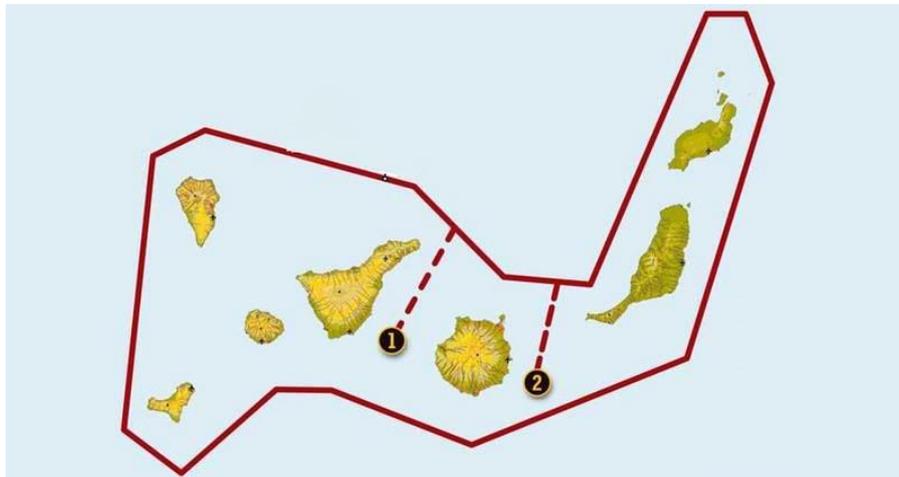


Figura 6.1. Delimitación de la zona marítima especialmente sensible. Donde se identifican la ruta occidental (1) y la ruta oriental (2) por donde debe circular el tráfico marítimo en tránsito.

En el 2005 las aguas en torno al archipiélago Canario fueron declaradas por la Organización Marítima Internacional (OMI) como Área Marina Especialmente Sensible, ya que el Archipiélago posee una importante reserva de biodiversidad y un entorno natural único que debe ser preservado. Se ha delimitado un perímetro de seguridad, que implica que los barcos que transiten dentro de él deben cumplir con una normativa y medidas de protección específicas. Entre las medidas tomadas está la delimitación de dos rutas de tránsito entre los canales de las islas para el transporte marítimo (Figura 6.1).

Según recoge el Consejo Mundial del Transporte Marítimo (WSC) en 2013 se movieron aproximadamente 120 millones de contenedores con mercancía, de los cuales se estima que una media de 733 contenedores caen al mar cada año, lo que supone un gran riesgo para la navegación. También destacamos el gran número de accidentes por naufragio que se producen en Canarias, debido a la entrada irregular de inmigrantes por vía marítima desde las costas de África. El peor año registrado fue el 2006, cuando 31.678 personas llegaron al archipiélago en pequeñas embarcaciones. Aunque a partir de 2010 la cifra ha descendido en más del 80% según estadísticas del Ministerio, sigue siendo habitual la llegada de inmigrantes por esta vía en embarcaciones precarias que hacen que el número de naufragios y accidentes sea elevado. Respecto a los riesgos ambientales a los que se ve sometido el archipiélago, destacamos la producción y el transporte de petróleo, que en caso de producirse algún accidente puede llegar a afectar la gran reserva de biodiversidad presente en las islas.

Por todo ello, es muy importante conocer las condiciones marítimas que se dan en esta región, en la que no siempre hay condiciones favorables para la navegación. El tener un buen conocimiento sobre el sistema de corrientes y que esa información pueda estar disponible y ser útil para las instituciones y la sociedad en general, es un recurso muy valioso. Mediante la colaboración con diferentes instituciones y organismos, los datos de las boyas de deriva han estado disponibles y han servido de apoyo para la toma de decisiones en casos prácticos, quedando demostrada la gran utilidad de disponer de este tipo de información. Toda la experiencia adquirida fruto de estas colaboraciones ha permitido sentar las bases para establecer una herramienta de apoyo a los sistemas de oceanografía operacional.

6.1. Herramienta de apoyo a la oceanografía operacional

Los sistemas de oceanografía operacional proporcionan un servicio integral de datos oceanográficos a los diferentes usuarios de medio, como apoyo a las actividades de seguridad marítima y de gestión ambiental. Frente a un determinado incidente se debe plantear una estrategia basada en las técnicas y herramientas disponibles en cada caso, con el objetivo de dar una respuesta rápida y sencilla a los diferentes usuarios. El principal problema que se plantea en los sistemas operacionales es la escasez de información disponible a tiempo para la toma de decisiones. Un sistema de oceanografía operacional se basa en la observación del océano, mediante la recopilación de datos históricos y en tiempo real, entre cuyas funciones está alimentar modelos numéricos que sean capaces de predecir la evolución de las diferentes variables del medio.

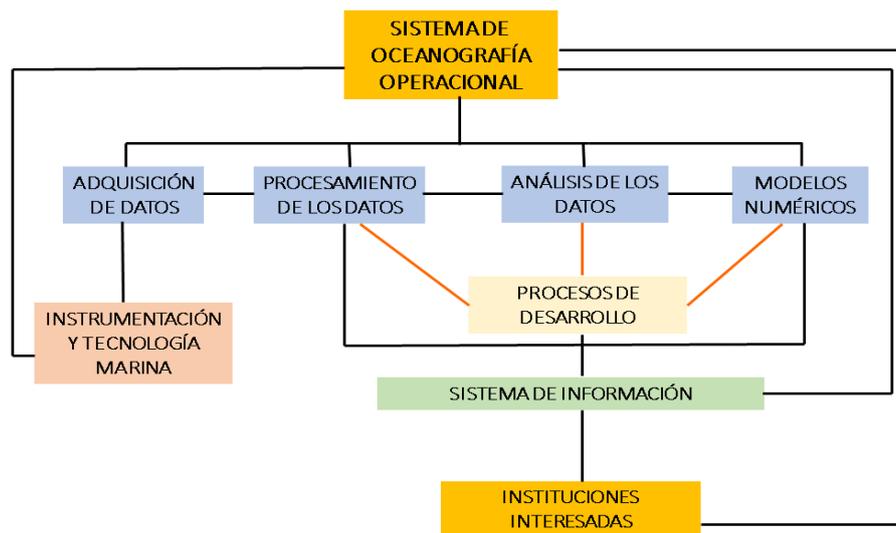


Figura 6.2. Esquema de un sistema de oceanografía operacional.

Actualmente una de las herramientas más útiles para el conocimiento de la dinámica oceánica es la simulación numérica, sin olvidar las necesidades observacionales para que los modelos proporcionen productos cada vez más fiables. La monitorización de las condiciones oceánicas en una determinada región, es un elemento fundamental tanto para la inicialización de los modelos como para su posterior validación.

Como parte de este trabajo se ha desarrollado una herramienta de apoyo a los sistemas de oceanografía operacional, con el objetivo de aportar información útil y relevante para la toma de decisiones frente un determinado incidente marítimo. A continuación se pasa a describir cada una de las fases en las que se presta servicios a las instituciones de salvamento, como parte integral de un sistema de oceanografía operacional.

Adquisición de los datos.

- El sistema se inicia con la adquisición de datos, tanto en tiempo real como históricos para la zona de interés. Las principales fuentes de datos en tiempo real y de previsiones son adquiridas por Puertos del Estado :

<http://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx>

Y por la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA):

<http://www.aoml.noaa.gov/phod/dataphod/work/trinanes/INTERFACE/index.html>

Ambas instituciones proporcionan una fuente de datos fiable de múltiples variables oceanográficas obtenidas de diferentes plataformas.

- Del mismo modo que se obtienen los datos en tiempo real que estén disponibles, los datos de las boyas de deriva, recopilados tras 15 años de observaciones, se encuentran organizados y homogeneizados de forma que se pueda extraer información de la serie de un modo sencillo y rápido. Esto permite aportar información de la corriente superficial para una zona y un periodo concreto a partir de los datos históricos. La herramienta para la adquisición de los datos de las boyas se describe en el siguiente apartado (ver 6.1.1).

Procesamiento y análisis de los datos.

Los datos son gestionados en base a las herramientas ensayadas en cada caso. Durante el desarrollo de esta tesis se ha trabajado con el software SIMOM (Pérez-Marrero, 2005) como gestor de la información oceanográfica (ver 3.2.3). Actualmente se usa el Software PLATEA 4D desarrollado por el SIANI (Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería) de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

Modelos numéricos

Tras la adquisición y el análisis de los datos, esta información es usada para alimentar los modelos numéricos que nos darán la previsión de las variables que se requieran en cada caso. Durante el desarrollo de esta tesis se ha trabajado con varios modelos numéricos de predicción, los cuales han sido descritos en el correspondiente apartado de material y métodos (ver 3.3).

Informes a las instituciones interesadas

Dependiendo del tipo de incidente (objeto a la deriva, naufragio, derrame de hidrocarburos, etc.) se presentará un informe de resultados, que estará basado en los requerimientos específicos del organismo o institución con el que se esté trabajando. Los resultados se pueden presentar en forma de mapas o tablas, con unas coordenadas (latitud-longitud) en torno a la cual se establece la zona más probable de búsqueda. El objetivo es que esta información sea fácilmente manejable y entendible por los diferentes usuarios.

Esta herramienta de apoyo a los sistemas de oceanografía operacional ha sido entrenada mediante ejercicios prácticos, gracias a la colaboración con instituciones de salvamento, lo que ha permitido valorar los resultados obtenidos en cada caso con el objetivo de poder mejorarlos.

6.1.1.Descripción de la herramienta estadística

Como parte de este trabajo se ha desarrollado una herramienta estadística, a partir de los 15 años de observaciones de boyas de deriva, con el propósito de que los datos obtenidos sean útiles y sirvan para la toma de decisiones en casos de incidentes marítimos. Esta herramienta permite tener una primera aproximación del sistema de corrientes, además de servir de base para los estudios de modelización numérica.

Las trayectorias de las boyas de deriva permiten identificar determinados fenómenos que, dependiendo de su escala espacio-temporal, pueden no ser identificados por los satélites. Si además tenemos en cuenta el problema añadido que se plantea, cuando los servicios de distribución de datos en tiempo real no están operativos en el momento de un incidente, se ve la necesidad de contar con una serie de datos históricos de la corriente superficial. Estos datos deben estar organizados en productos específicos y de fácil accesibilidad, para que permitan dar respuesta de un modo rápido y sencillo a las instituciones responsables frente a un determinado incidente. En caso de crisis, la existencia por sí misma de series temporales carece de valor porque hay que tomar decisiones rápidas y no hay tiempo para el análisis de los datos. Es por ello, que la primera parte de este trabajo ha consistido en tener la información de las boyas de deriva organizada y homogeneizada. La región de Canarias objeto de estudio, está distribuida en cuadrículas de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ para cada una de las cuales se ha calculado el campo medio de la velocidad, en intensidad y dirección, así como la desviación de la media que nos indica la variabilidad.

Se han elaborado unas herramientas de búsqueda, que nos permiten extraer la información de la serie de datos de un modo sencillo y rápido. El entorno de trabajo ha sido desarrollado en IDL 6.1 (Interactive Data Language) un lenguaje de programación orientado al análisis y visualización de datos. La herramienta se ha desarrollado para trabajar con ventanas espacio-temporales (Pérez-Marrero, 2005). Como punto de partida para iniciar el estudio se toma la información del incidente (la última posición conocida en latitud y longitud, la fecha del incidente y tiempo transcurrido desde el aviso).

El primer filtro que se realiza en la serie de datos es el área. Una vez definido el punto del incidente ejecutamos el programa que extrae todos los datos en torno a ese punto, obteniéndose los datos de las boyas de deriva disponibles para esa región. La resolución de la ventana espacial es variable, inicialmente se ha definido en torno a $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ pero esta resolución puede ser ampliada o reducida en función de cada caso. Los resultados obtenidos son analizados para determinar si la zona presenta algún patrón en el campo de las corrientes superficiales. Posteriormente se obtiene la intensidad y dirección media, así como la desviación estándar de la media para todo el registro de datos seleccionado. El segundo filtro que se realiza en la serie de datos es el tiempo. Ejecutamos el programa que extrae de la serie inicialmente filtrada, los datos de las boyas que coincidan con el instante en el que se produjo el incidente para los años anteriores. El análisis de los resultados obtenidos permitirá identificar si hay algún patrón estacional en la serie de datos.

Con los resultados obtenidos (en el espacio y en el tiempo) se calcula la velocidad de deriva a partir de la velocidad y dirección promedio de la serie de datos, teniendo en cuenta el tiempo que haya transcurrido desde el momento en el que tuvo lugar el incidente. Como resultado se obtiene la trayectoria más probable a partir de los datos históricos, estableciéndose una zona de mayor probabilidad de búsqueda. Esta primera aproximación estadística, basada en datos empíricos, permite tener un conocimiento previo de las características del campo de corrientes en la zona. La información es entregada a las instituciones responsables con la suficiente cautela de que se trata de un análisis de las características de la zona y que los resultados se basan en lo ocurrido en los años anteriores. En los casos en los que haya pocos datos disponibles en torno al punto del incidente este estudio estadístico tiene poco sentido, de ahí la importancia de haber mantenido durante más de 15 años el despliegue de boyas de deriva en la zona. La información del estudio estadístico es complementada con datos en tiempo real del campo de viento y de la corriente superficial siempre que estén disponibles. Del mismo modo estos datos son usados para alimentar los modelos numéricos de predicción, con el propósito de obtener la trayectoria más probable de un objeto que se encuentre a la deriva. En base a estas dos aproximaciones, la estadística y la numérica, las instituciones responsables pueden definir una estrategia de búsqueda.

6.1.2 Actuación en casos de accidentes reales

En este apartado se describen dos ejemplos en los que se ha colaborado conjuntamente con salvamento en casos de accidentes reales, donde se ha aplicado la metodología anteriormente descrita.

Accidente de octubre de 2004

El 15 de octubre de 2004 el Centro Coordinador de Rescates de Canarias (RCC-Canarias) avisó al departamento de Oceanográfica del Instituto Canario de Ciencias Marinas de un incidente. Se había perdido comunicación con un barco pesquero que se encontraba a la deriva al sureste de la costa de la isla de Gran Canaria. Partiendo del punto donde se tuvo comunicación por última vez con la embarcación (27.70° norte y 15.40° oeste) se realizó un análisis estadístico a partir de los datos de las boyas disponibles hasta ese momento. Para ese periodo se recopilaban los datos disponibles en tiempo real. Se obtuvieron los datos de viento a partir de datos de satélite (QuickScat). Para el día del accidente se registraron vientos moderados en torno a 27 km/h. Los datos de corriente geostrófica no estaban disponibles para el momento del incidente.

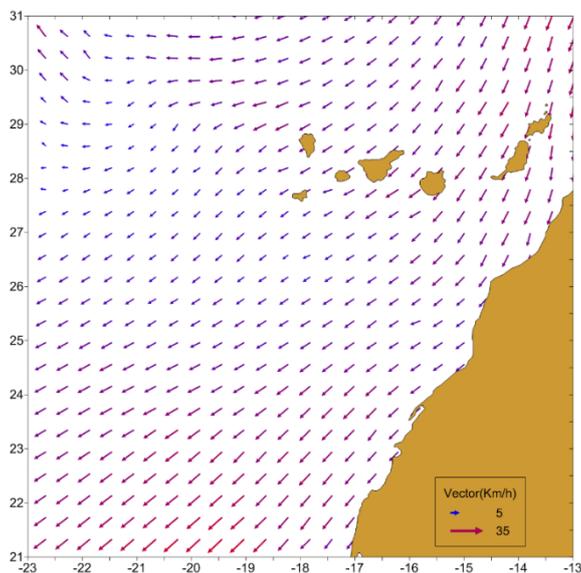


Figura 6.3. Campo de vientos a 10 metros de la superficie obtenido desde el satélite QuickScat para el 15 de octubre de 2004.

Se aplicó el procedimiento, extrayendo de la serie de datos de las boyas todos los registros contenidos dentro de una cuadrícula de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ en torno al punto del accidente. Y posteriormente de esa serie se extrajeron los datos coincidentes con el periodo del accidente (octubre) para los años anteriores.

	Nº Registros	Nº boyas	Velocidad (cm/s)			
			max.	min.	med.	desv.Std
Zona accidente	643	20	50,66	0,089	16,24	12,15
Periodo del accidente	135	4	48,25	0,089	20,45	12,50

Tabla 6.1. Resultados estadísticos de la velocidad para los datos extraídos de la serie para la zona y periodo del accidente.

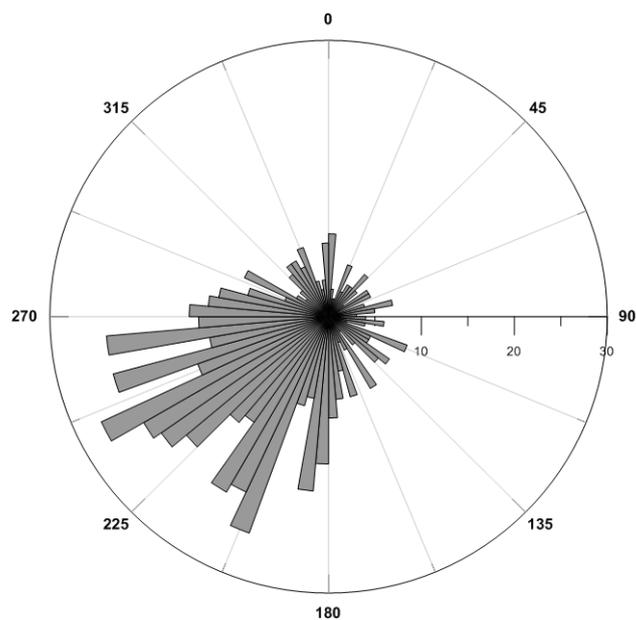


Figura 6.4. Diagrama de direcciones del registro de datos extraído en torno al punto del accidente.

A continuación se muestra la trayectoria de las 4 boyas de deriva coincidentes en el espacio y en el tiempo para el periodo del accidente. Observándose la tendencia dirección suroeste para las cuatro boyas identificadas en ese periodo.

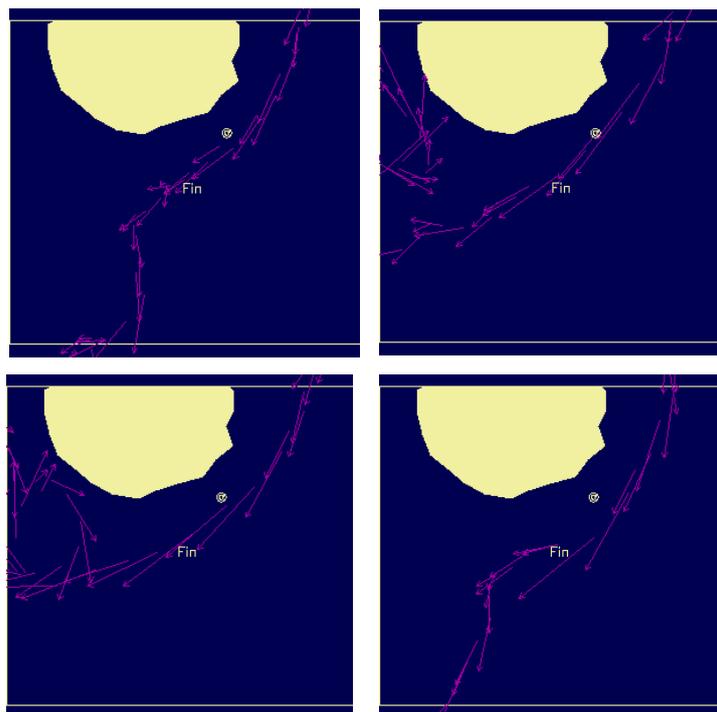


Figura 6.5. Trayectorias de las 4 boyas de deriva coincidente en el espacio y en el tiempo para el incidente del 15 de octubre de 2004. El punto @ indica el lugar del accidente y FIN indica donde fue localizada la embarcación transcurridas 15 horas.

Con los resultados obtenidos se calcula la velocidad de deriva, tomando la intensidad y dirección media de las boyas extraídas de la serie de datos para la zona y periodo del incidente. Se calculó una deriva de 0,46 millas náuticas por hora, con un rumbo de 235° dirección suroeste. Transcurridas 15 horas desde el momento del aviso, se confirmó desde el RCC-Canarias que la embarcación había aparecido en el punto 27.60° norte y 15.50° oeste. Tras conocer el punto inicial y final, se hizo una simulación con el modelo numérico desarrollado por LAMTec con un horizonte de predicción de 15 horas. Para el periodo del incidente los datos de corriente geostrofica no estaban disponibles, por lo que la simulación numérica se hizo solo teniendo en cuenta los datos de viento. Los resultados obtenidos por el modelo numérico se presentan a continuación junto con los del estudio estadístico.

	Rescate	Estudio estadístico	Modelo numérico
Posición final	27.60°N, 15.50° W	26.64° N, 15.50° W	26.67° N, 15.54° W
Distancia recorrida	8,2 m n	6,9 m n	7,6 m n
Rumbo	220°	235°	260°

Tabla 6.2. Resultados de la posición obtenida por el estudio estadístico y el modelo numérico transcurridas 15 horas desde el momento del incidente.

A continuación se muestran las trayectorias obtenidas por el estudio estadístico y el modelo numérico de predicción, respecto a la posición donde se encontró el barco a la deriva.

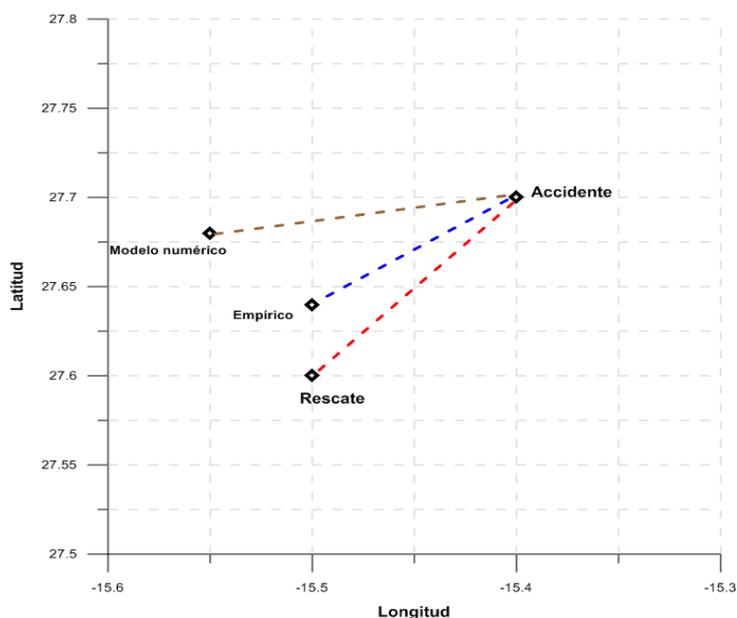


Figura 6.6. Representación de la posición real del rescate, frente a la posición obtenida del estudio estadístico (trayectoria en azul) y la posición obtenida del modelo numérico (trayectoria marrón).

Destacamos que en este caso, en el que no se disponían de datos de corrientes para la inicialización del modelo, los resultados obtenidos del estudio estadístico se acercan más a la posición real que los obtenidos del modelo. La posición real respecto a la posición obtenida del estudio estadístico difiere en 2,5 millas náuticas. La posición obtenida del modelo numérico difiere en 5 millas náuticas respecto a la posición real.

Accidente de marzo de 2014

El 19 de marzo de 2014 tuvo lugar el accidente de un helicóptero del Servicio Aéreo de Rescates del Ejército del Aire, a unas 30 millas al sur de la península de Jandía en la isla de Fuerteventura. El RCC-Canarias contactó con la Plataforma Oceánica de Canarias para informar de lo ocurrido y proporcionó la posición y la hora en la que se tuvo la última comunicación con la aeronave.

Partiendo del punto donde se tuvo comunicación por última vez (27.70° norte y 14.75° oeste a las 21:55 horas del 19) se realizó un análisis estadístico a partir de los datos de las boyas disponibles hasta ese momento en la zona. Se recopilaron los datos en tiempo real, así como las predicciones disponibles del modelo de MyOcean suministradas por Puertos del Estado. Los datos en tiempo real indicaban un viento de 7-8 m/s del noreste y corrientes dirección suroeste de 15-25 cm/s.

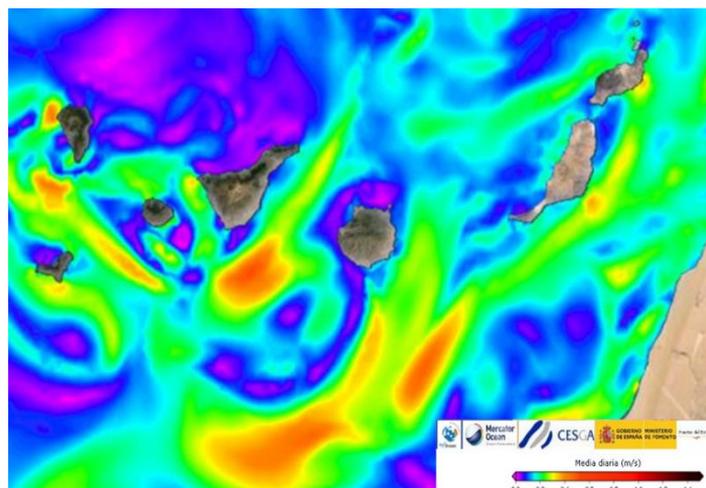


Figura 6.7. Mapa de predicción de corrientes suministrado por Puertos de Estado para el día del accidente (19/03/2014)

Para el análisis estadístico se aplicó el procedimiento, extrayendo de la serie de datos todos los registros contenidos dentro de una cuadrícula de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ en torno al punto del accidente. Y posteriormente se extrajeron los datos coincidentes con el periodo del accidente para los años anteriores.

En este caso solo se identificaron tres boyas de deriva en la zona del accidente y ninguna de ellas coincidió con el mes en el que ocurrió el accidente.

	Nº registros	Nº boyas	Velocidad (cm/s)			
			max.	min.	med.	desv.Std
Zona accidente	152	3	30,60	0,95	11,73	6,58
Periodo del accidente	-	-	-	-	-	-

Tabla 6.3. Resultados estadísticos de la velocidad para los datos extraídos de la serie para la zona y periodo del accidente.

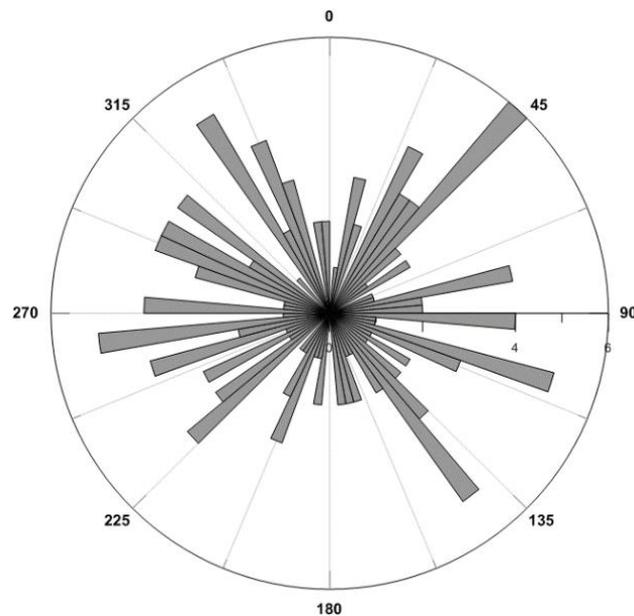


Figura 6.8. Diagrama de direcciones del registro de datos extraído en torno al punto del accidente.

Los datos estadísticos obtenidos para la zona en torno al accidente, indican una velocidad media de la corriente en torno a los 12 cm/s con una marcada variabilidad en dirección, debido a que dos de las tres boyas identificadas en esa área, se quedan retenidas en una estructura ciclónica.

A continuación se muestra la trayectoria de las dos estructuras ciclónicas identificadas por las boyas en la zona del accidente. La boya 44115, se queda retenida en una estructura ciclónica el 11 de enero de 2011 durante 23 días alcanzando velocidades máximas durante ese tiempo de 30,6 cm/s. La boya 71116, se queda retenida en un remolino ciclónico el 5 de diciembre de 2010 durante 26 días, alcanzando velocidades máximas de 26 cm/s durante ese periodo.

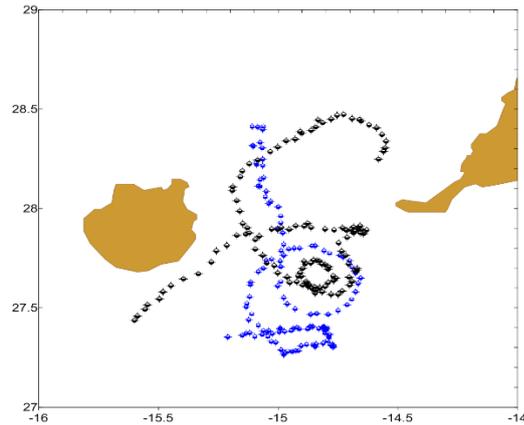


Figura 6.9. Trayectoria de las 2 boyas de deriva que pasaron por la zona del accidente. Boya 44115 (negro) y boya 71116 (azul).

Como complemento al estudio estadístico de las boyas, se analizaron los resultados de predicción obtenidos del modelo MyOcean. Las predicciones de la velocidad de la corriente para el día posterior al accidente fueron de 20 cm/s y dirección suroeste (210°).

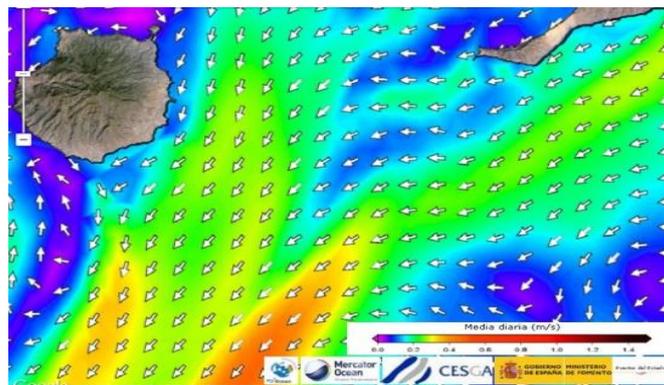


Figura 6.10. Mapa de predicción de corrientes suministrado por Puertos del Estado para el día posterior al accidente (20/03/2014).

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos de las boyas, se contempló la posibilidad de que no hubiese desplazamiento hacia el suroeste, como se podía prever de los datos de previsión obtenidos por el modelo (Figura 6.10). Transcurridas 12 horas desde el momento del accidente, se observó que las posiciones de deriva de los restos del aparato indicaba un desplazamiento que inicialmente iban hacia el sur, pero en pocas horas cambió y derivaron hacia el norte. Posteriormente se confirmó por parte del Centro Coordinador de Rescates que el helicóptero se encontraba hundido muy cerca de donde se tuvo comunicación por última vez.

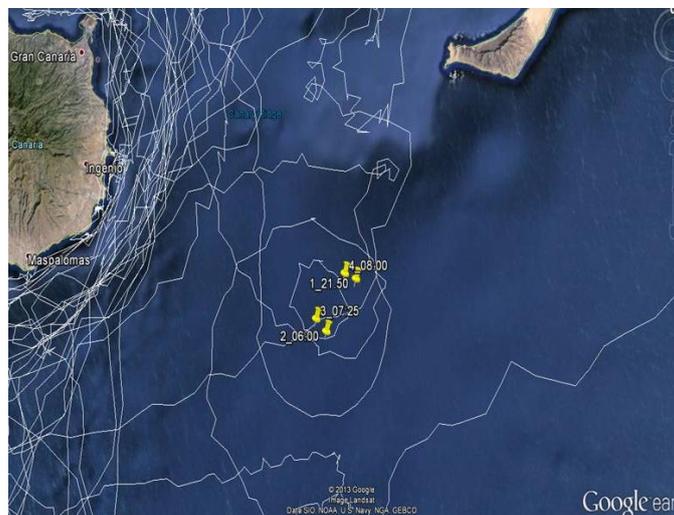


Figura 6.11. Mapa donde se observa la deriva del aparato transcurridas las primeras 12 horas desde el incidente (las marcas amarillas indican las posiciones de deriva en función de la hora). Las líneas blancas son las trayectorias de las boyas de deriva en esa zona.

Con este ejemplo quedó demostrado que hay que tener en cuenta el efecto que pueden producir las estructuras mesoescalares de tipo remolino, sobre el movimiento de los objetos que se encuentran a la deriva en la superficie del océano. Los resultados del modelo no contemplaron esta posibilidad, que si quedó identificada con los datos históricos de las boyas de deriva.

6.1.3. Ejercicios prácticos con Salvamento

Como se ha venido explicando, el estudio de circulación superficial del océano es una pieza clave para mejorar la seguridad marítima. Durante el desarrollo de este trabajo de tesis, se ha venido colaborando activamente con instituciones de salvamento mediante la realización de ejercicios prácticos. La colaboración con el Centro Coordinador de Rescates de Canarias (RCC-Canarias) del Ejército del Aire y el 802 escuadrón de las Fuerza Aéreas, comenzó en el año 2005 y ha quedado consolidada con la firma de un convenio el 9 de marzo de 2015 entre el Ministerio de Defensa/ el Ejército de Aire y La Plataforma Oceánica de Canarias. Este convenio se basa en el estudio de las corrientes marinas en el ámbito de Canarias y el servicio de búsqueda y salvamento. Durante estos años de colaboración se han realizado cerca de 50 acciones conjuntas, de las cuales algunos ejemplos se presentan en este trabajo.

Se han realizado varios ejercicios de simulacros de accidentes marítimos entre las islas de Gran Canaria y Fuerteventura. Se ha seleccionado esa zona porque por ese canal pasa una de las rutas de tránsito para el transporte marítimo y donde por razones logísticas los ejercicios se pueden hacer con mayor simplicidad. Los resultados obtenidos de los ejercicios han servido para evaluar los procedimientos llevados a cabo y entrenar el sistema con el objetivo de mejorarlo.

En los ejercicios de simulacro se despliega un dispositivo flotante que simula una balsa salvavidas equipada de un ancla de capa (Figura 6.13). Para tener la trayectoria de la balsa localizada todo momento se le engancha una baliza de posicionamiento modelo OTR-MLi (Figura 6.15). La baliza consta de un panel solar que permite recargar su batería y un GPS que da la posición en todo momento, la comunicación es mediante la red de satélites INMARSAT. En la siguiente figura se muestra las localizaciones y las fechas de los simulacros que se han realizado, las trayectorias en el mapa indican la trayectoria seguida por la balsa salvavidas en cada caso.

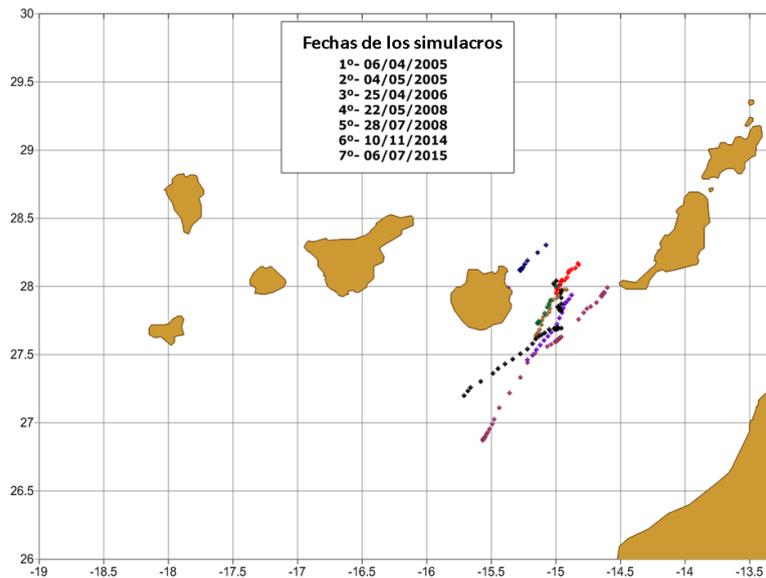


Figura 6.12. Localización y fechas en las que se han realizado ejercicios de simulacro.

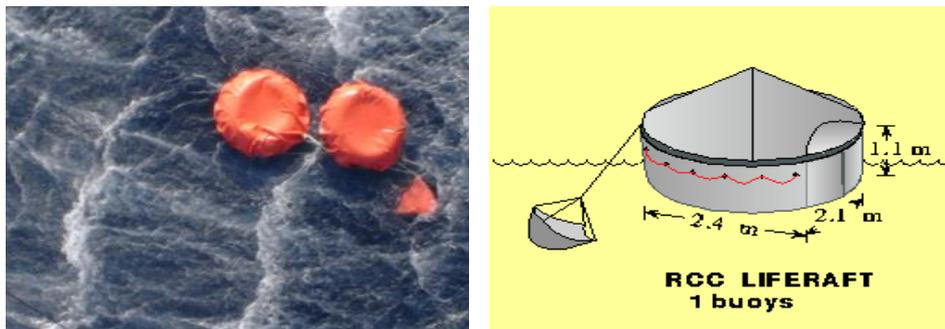


Figura 6.13. Sistema de balsa salvavidas usado en los ejercicios de simulacro en coordinación con el Centro Coordinador de Rescates de Canarias.

Durante el desarrollo de los simulacros se ponen en marcha las herramientas de apoyo al sistema de oceanografía operacional descritas en el anterior apartado (ver 6.1), con el objetivo de obtener la zona de búsqueda más probable. Tras la entrega de los resultados a las instituciones de salvamento, se procede a la recuperación de los dispositivos y a la posterior validación de los modelos una vez conocida la trayectoria real. En los siguientes apartados se pasan a describir los resultados de los simulacros realizados.

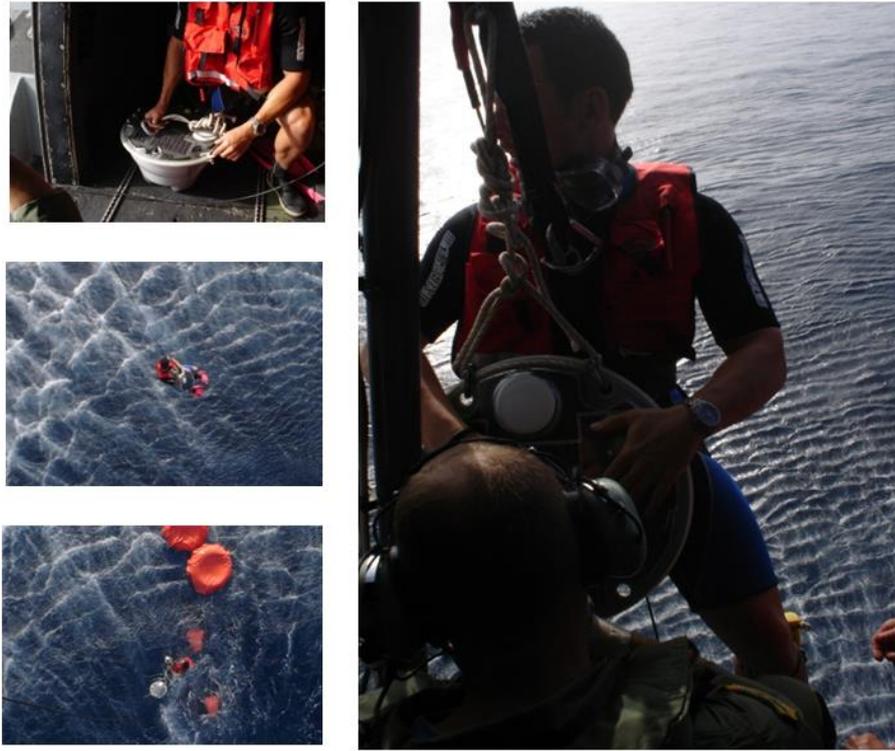


Figura 6.14. Despliegue de una balsa salvavidas con baliza de posicionamiento por parte del 802 Escuadrón del Ejército del Aire.

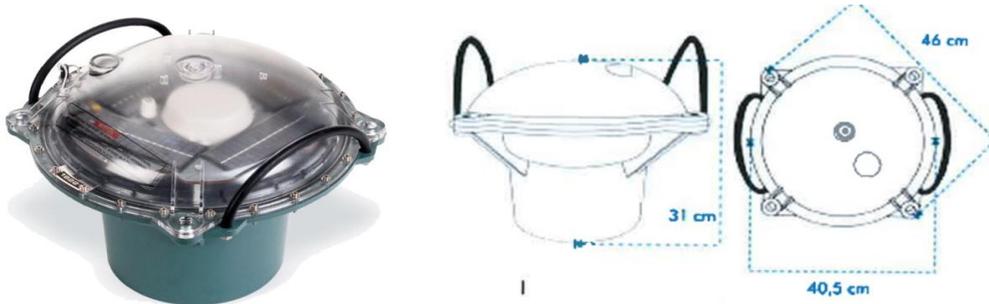


Figura 6.15. Baliza de posicionamiento que se engancha a la balsa salvavidas en los casos de simulacros de accidentes.

Ejercicio del 6 de abril de 2005

El 6 de abril de 2005 se realizó el primer ejercicio de simulacro con el Centro Coordinador de Rescates de Canarias. Se definió un punto entre la isla Gran Canaria y Fuerteventura y se desplegó una balsa salvavidas con una baliza de posicionamiento y se siguió su trayectoria durante 6 días. El modelo usado en este ejercicio fue el modelo de predicción de trayectorias desarrollado por LAMTec, descrito en el apartado de material y métodos (ver 3.3.1). Los datos de previsión del viento y de corrientes se recopilaron para ese periodo de 6 días y se introdujeron en el modelo obteniendo como resultado la trayectoria más probable. Los resultados obtenidos pudieron ser comparados con la trayectoria real seguida por la balsa. En este caso en concreto se realizaron dos simulaciones diferentes, se hizo una primera simulación teniendo solo en cuenta el viento y el oleaje, y una segunda simulación teniendo en cuenta también la corriente superficial. Los resultados de ambas simulaciones se observan en las siguientes figuras.

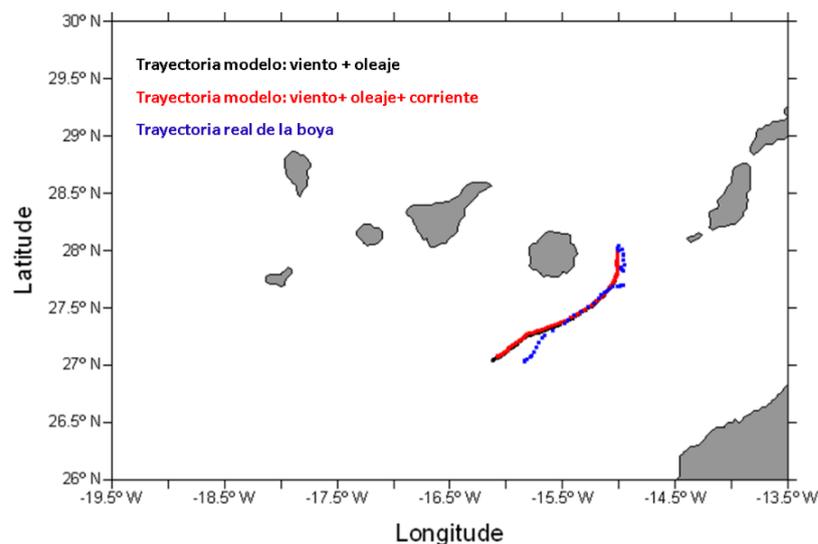


Figura 6.16. Trayectoria real de la balsa a la deriva (azul), trayectoria obtenida por el modelo teniendo en cuenta solo el viento y oleaje (negro) y trayectoria del modelo teniendo en cuenta el viento, oleaje y corrientes (rojo).

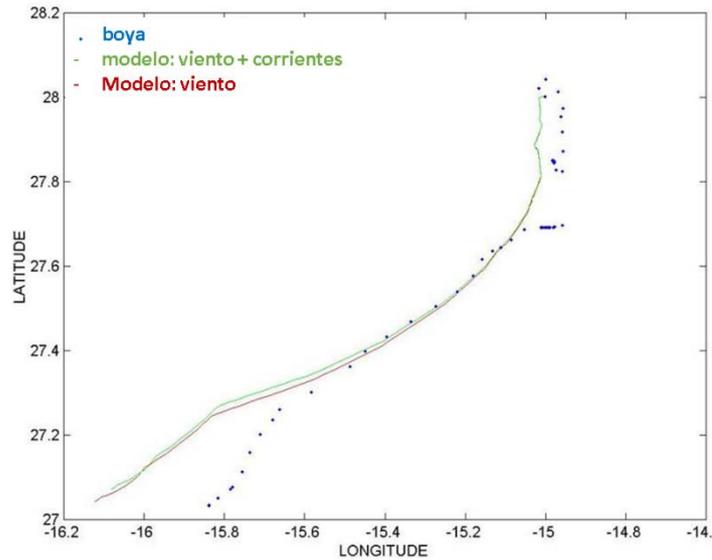


Figura 6.17. Resultados en más detalle de la trayectoria real de la balsa a la deriva (azul), trayectoria obtenida por el modelo teniendo en cuenta solo el viento y oleaje (rojo) y trayectoria del modelo teniendo en cuenta el viento, oleaje y corrientes (verde).

En las anteriores gráficas podemos ver la trayectoria real seguida por la balsa, comprada con las trayectorias de las dos simulaciones realizadas. En este caso en particular, el conocimiento de las corrientes no altero significativamente el resultado de la trayectoria obtenida por el modelo. Esto se debe a que el ejercicio coincidió con un periodo en el que las corrientes eran muy débiles, en torno a 6,4 cm/s. Podemos observar en base a los resultados, que la previsión resultó ser bastante óptima, la trayectoria real y la obtenida por el modelo presentan una alta correlación. Es a partir del quinto día cuando la predicción se aleja de la trayectoria real de la balsa. Por lo que se puede concluir que el modelo presenta un buen ajuste para los primeros 4 días de simulación.

Para los simulacros llevados a cabo durante el periodo entre mayo de 2005 y julio de 2008, se aplicó el mismo procedimiento. A continuación se representan los resultados obtenidos del modelo de predicción de LAMTec comparado con la trayectoria real de la balsa salvavidas para cada caso.

Ejercicio del 4 de mayo de 2005

En la siguiente figura se representa la trayectoria de la balsa salvavidas tras 24 horas a la deriva junto con la trayectoria obtenida de la simulación numérica para el ejercicio del 4 de mayo de 2005. En este caso la simulación se ajusta bastante a la trayectoria seguida por la balsa. Es solo en las últimas horas cuando el modelo se aleja de la trayectoria real, desplazándose 8,7 kilómetros dirección suroeste (225°) respecto del punto donde fue recogida la balsa.

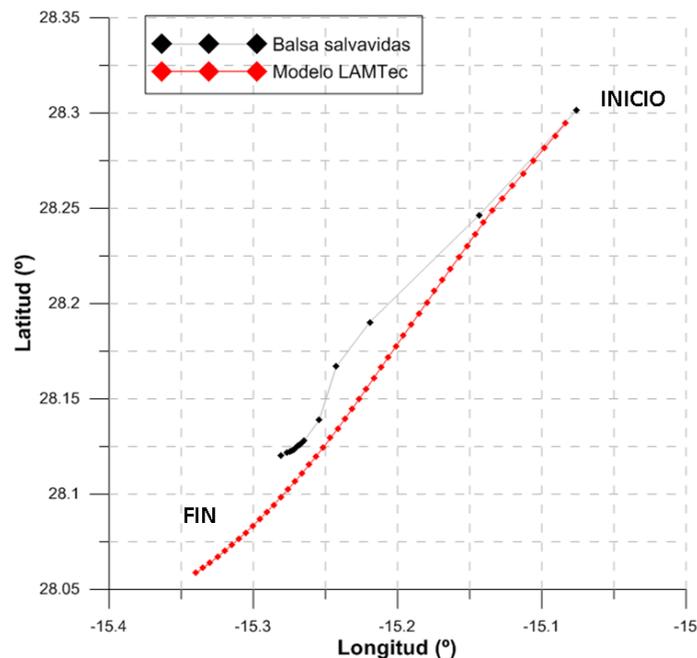


Figura 6.18. Trayectoria real de la balsa salvavidas junto con la trayectoria obtenida por el modelo para el ejercicio del 4 de mayo de 2005.

Ejercicio del 25 de abril de 2006

En la siguiente figura se representa la trayectoria de la balsa salvavidas tras 36 horas a la deriva, junto con la trayectoria obtenida de la simulación numérica para el 25 de abril de 2006. En este caso la simulación también se ajusta bastante a la trayectoria seguida por la balsa, encontrándose a lo largo de la trayectoria varios puntos coincidentes. El punto final donde se recoge la balsa difiere respecto del obtenido por el modelo en apenas 4 kilómetros hacia el este.

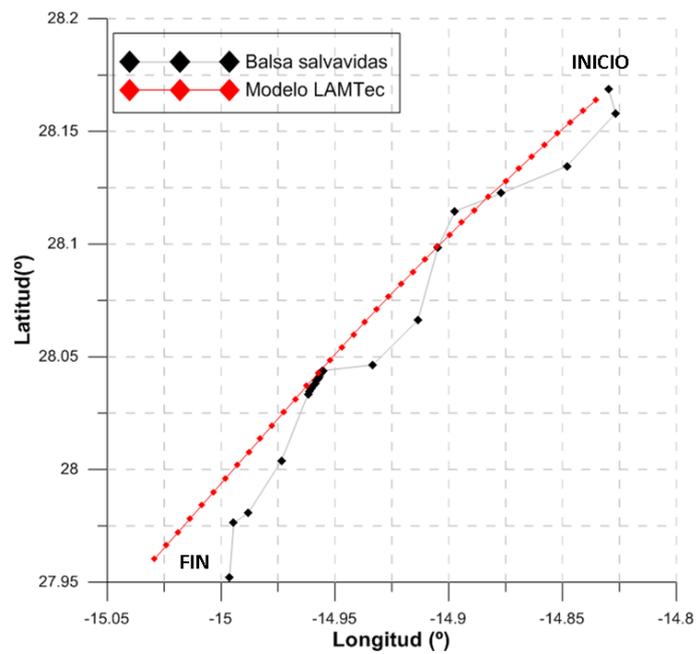


Figura 6.19. Trayectoria real de la balsa salvavidas junto con la trayectoria obtenida por el modelo para el ejercicio del 25 de abril de 2006.

Ejercicio del 22 de mayo de 2008

En la siguiente figura se representa la trayectoria de la balsa salvavidas tras 24 horas a la deriva, junto con la trayectoria obtenida de la simulación numérica para el 22 de mayo de 2008. En este caso ambas trayectorias, la simulada y la real, toman una dirección suroeste, pero se observa como la trayectoria obtenida por el modelo se va alejando de la trayectoria de la balsa en unos 2 kilómetros al principio, aumentando hasta 9 kilómetros su distancia a las 24 horas de simulación.

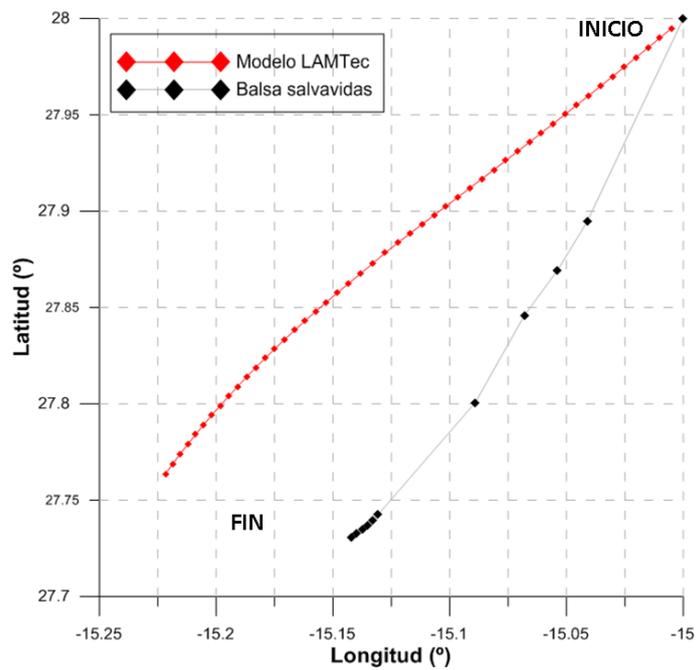


Figura 6.20. Trayectoria real de la balsa salvavidas junto con la trayectoria obtenida por el modelo para el ejercicio del 22 de mayo de 2008.

Ejercicio del 28 de julio de 2008

En la siguiente figura se representa la trayectoria de la balsa salvavidas tras 48 horas a la deriva, junto con la trayectoria obtenida de la simulación numérica para el 28 de julio de 2008. En este caso, la simulación se corresponde bastante con la trayectoria seguida por la balsa. El punto final donde se recoge la balsa difiere respecto del obtenido por el modelo en apenas 2 kilómetros.

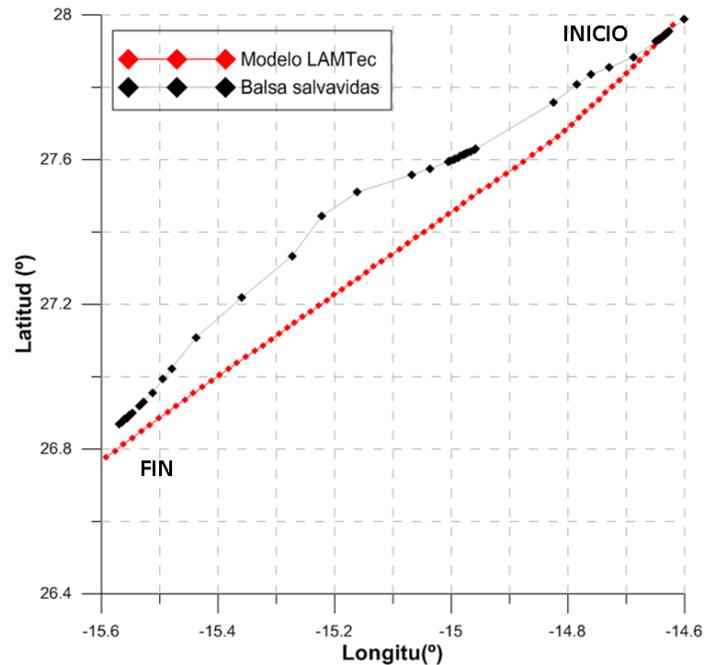


Figura 6.21. Trayectoria real de la balsa salvavidas junto con la trayectoria obtenida por el modelo para el ejercicio del 28 de julio de 2008.

En general se puede considerar que para todos los ejercicios realizados con el modelo de predicción de LAMTec, las simulaciones se corresponden bastante con la trayectoria real seguida por la balsa salvavidas. Los resultados de las simulaciones para las primeras 24-48 horas se pueden considerar óptimos. En todos los casos la dirección inicial de la trayectoria obtenida por modelo coincidió con la dirección seguida por la balsa. La máxima distancia encontrada entre ambas trayectorias fue en torno a los 9 kilómetros. Esta distancia está dentro del rango del área de búsqueda por parte de los servicios aéreos de rescate, por lo que estos resultados se pueden considerar una buena aproximación para establecer las áreas más probables de búsqueda.

Ejercicio del 10 de noviembre de 2014

En los últimos simulacros llevados a cabo con el Centro Coordinador de Rescates, se ha trabajado en colaboración con el SIANI (Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería) para el uso del software PLATEA 4D. Es una plataforma tecnológica de última generación diseñada para facilitar el desarrollo de sistemas de monitorización, representación geográfica y análisis de la información. Este software permite integrar datos de predicciones de corrientes y de vientos y además tiene integrado un modelo de transporte que permite predecir la trayectoria de un objeto a la deriva (especialmente diseñado para el seguimiento de vertidos). Esta herramienta permite ayudar para la toma de decisiones en caso de accidentes reales. El software tiene una interfaz gráfica que permite visualizar la información durante todo el proceso.

El 10 de noviembre de 2014 se lanzó una balsa salvavidas en el canal entre Gran Canaria y Fuerteventura y se dejó 48 horas a la deriva. Durante el periodo que el dispositivo estuvo en el agua se recopilaron los datos de corrientes y de viento y se integraron en el software PLATEA 4D. El software además de realizar la gestión de los datos, predijo mediante el modelo de transporte, la posición más probable para un horizonte de predicción de 48 horas. A continuación se muestra la interfaz gráfica del software PLATEA4D tras la integración de los datos de viento y de corrientes.

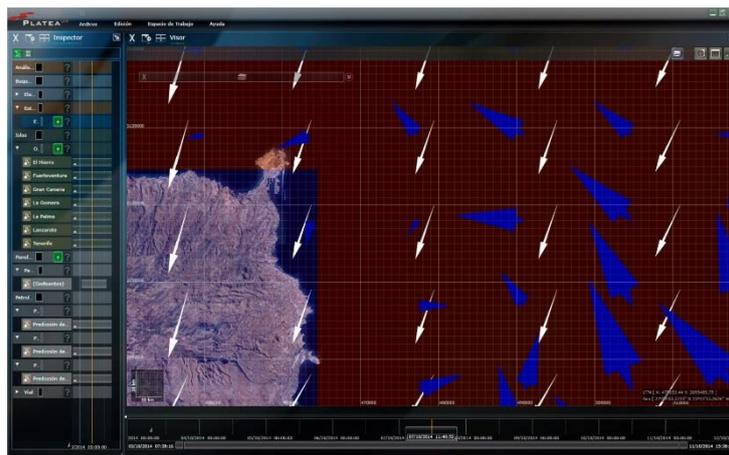


Figura 6.22. Interfaz gráfica del software PLATEA 4D. Donde se muestra la integración de los datos de corrientes (vectores en azul) y de viento (vectores en blanco) para el 10 de noviembre de 2014.

La balsa tras 48 horas en el agua se desplazó un total de 48 kilómetros con un rumbo en la dirección sur-suroeste y una velocidad promedio de 25 cm/s. Para las primeras 24 horas la simulación del modelo se ajustó bastante a la trayectoria real de la balsa, distando tan solo 1,5 kilómetros entre la posición real y la simulada por el modelo. Para ese periodo se identificó, mediante los datos de corrientes, una estructura de tipo remolino al este de la isla de Gran Canaria. El modelo tiene la suficiente resolución para identificar ese tipo de estructura mesoescalar y la predicción indicaba que la balsa no se desplazaba grandes distancias hacia el suroeste porque quedaría frenada por esa estructura mesoescalar. Pero a partir de las 24 horas la distancia entre la posición obtenida del modelo y la real aumentó. Esto fue debido a que a partir de ese instante se produjo una intensificación de la corriente, que hizo que la balsa se desplazase hacia el suroeste llegando a alcanzar una velocidad máxima de hasta 57 cm/s. Esta intensificación y desplazamiento hacia el suroeste no fue estimada por el modelo, por lo que presenta una buena aproximación solo para las primeras 24 horas. El punto final donde se recoge la balsa difiere respecto del obtenido por el modelo en 26 kilómetros.

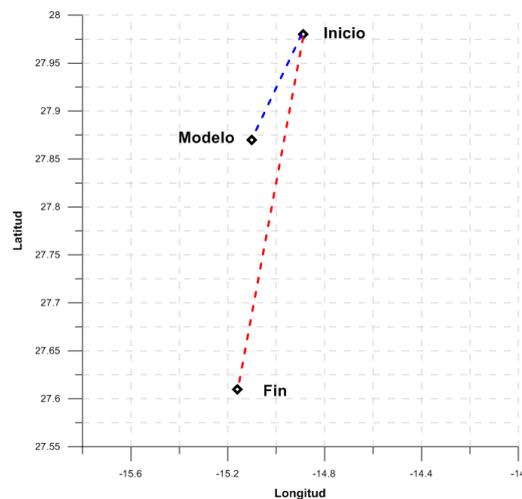


Figura 6.23. Posición inicial y final de la balsa salvavidas junto con la posición final obtenida por el modelo para el ejercicio del 10 de noviembre de 2014.

En general podemos considerar que el modelo presenta un buen ajuste para las primeras 24 horas. A medida que aumentamos el horizonte de predicción aumentamos la incertidumbre y los resultados se alejan de la situación real. De ahí la importancia de hacer más ejercicios aumentando los horizontes de predicción, para ensayar el sistema y mejorar los resultados en esos casos.

7. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

7. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

✓ Como parte del objetivo principal planteado en este trabajo, se ha mejorado la observación de la corriente superficial en la región de Canarias mediante el despliegue sistemático de boyas de deriva en la zona. Un gran logro tanto logístico como operacional, que ha requerido la coordinación de los medios e instituciones implicadas y que ha quedado consolidado con el despliegue de 130 boyas de deriva, como contribución al Programa Global de Drifters. Actualmente este proyecto continúa operativo y se van a seguir realizando despliegues, sobre todo cerca de la costa de África y las islas de Lanzarote y Fuerteventura, para cubrir esa zona que es la que presenta un menor número de observaciones. Del mismo modo que se ha venido haciendo durante el desarrollo de este trabajo, se seguirán desplegando boyas de deriva en los casos particulares en los que sea necesario. Como puede ser el seguimiento en caso de incidentes marítimos, así como en los casos de simulacros con instituciones de salvamento o como complemento a los estudios de los modelos numéricos de predicción en la zona.

✓ Como resultado del análisis de las trayectorias de las boyas, se han determinado los principales patrones de circulación entre los canales de las islas. Se han identificado dos rutas, la primera y más predominante es dirección sur-suroeste pasando entre los canales de las islas y la segunda es dirección oeste sin cruzar por el archipiélago. Del mismo modo, se han identificado determinadas regiones de la costa, las cuales presentan una alta vulnerabilidad en caso de producirse accidentes marítimos. Son zonas donde las boyas de deriva impactan de un modo concurrente, debido al obstáculo que presentan las islas al paso del flujo de la corriente. Estas regiones hay que tenerlas en cuenta, sobre todo en los casos de accidentes que puedan ocurrir al norte del archipiélago. Las islas más vulnerables son las de Tenerife y Gran Canaria en donde se han registrados el mayor número de impactos. También destacamos la presencia de numerosas estructuras mesoescalares de tipo remolino, tanto ciclónicas como anticiclónicas. Estas estructuras hay que tener en consideración en caso de incidentes marítimos porque conlleva que los objetos que se encuentran a la deriva puedan quedar retenidos en estos remolinos durante largos periodos de tiempo. El periodo máximo de duración identificado para estas estructuras ha sido 9 meses.

✓ Mediante el análisis estadístico de los datos obtenidos de las boyas, se ha determinado que la velocidad media para la serie completa es de 13,5 cm/s. Tras el análisis mensual se ha obtenido que la máxima velocidad media se corresponde con el mes de julio con 14,22 cm/s y la mínima con el mes de febrero con 12,37 cm/s de media. La máxima velocidad registrada es durante el mes de agosto y alcanza los 100,44 cm/s. En cuanto a la variabilidad interanual de la velocidad, se observa una tendencia en aumento de la velocidad de la corriente con los años. Observándose en los 10 primeros años de la serie de datos (1999-2009), como la velocidad se organiza en ciclos de cinco años. Dos años consecutivos de aumento de la velocidad seguidos de un periodo de tres años consecutivos de descensos.

✓ Con respecto al área de estudio (24°-30° norte y 21°-12° oeste), al norte de las islas se registran los valores más bajos, donde se aprecia una tendencia de la corriente en dirección oeste a partir de los 16° oeste de longitud. Se observa una intensificación de la corriente en los canales y al suroeste de las islas, donde la dirección es predominantemente hacia el suroeste. Al oeste de la isla de La Palma y El Hierro se observa la presencia de una estructura ciclónica casi de modo permanente. También se aprecia una corriente dirección norte paralela a la costa de África. En base a los resultados podemos destacar la gran variabilidad de la corriente en esta zona, donde se aprecia una marcada estacionalidad. Estos resultados coinciden con los estudios realizados por otros autores en este área.

✓ El estudio de las correlaciones de la velocidad de la corriente geostrófica y el viento con la velocidad de la boya, ha permitido estimar el efecto que producen estas variables sobre la deriva de estos dispositivos. Los resultados muestran que la aportación de la corriente geostrófica al movimiento de la boya está en torno al 65% y que debido a las características de diseño de estos dispositivos el efecto del viento va a ser mínimo. Se puede considerar que el efecto del viento y de la corriente sobre la velocidad de deriva dependerá principalmente de las características del objeto que se encuentre en la superficie del mar. De ahí la importancia de realizar ejercicios prácticos con objetos de diferentes características.

✓ Los datos de las boyas de deriva han servido para validar diferentes modelos numéricos de predicción. Comparando los resultados obtenidos de las simulaciones con la trayectoria de boyas a la deriva, es posible mejorar los resultados y adaptarlos a esta zona. En los estudios realizados, los resultados de las simulaciones no siempre se corresponden con la situación medida por las boyas, especialmente en los casos en los que las boyas se quedan retenidas en estructuras mesoescalares. Esto evidencia lo difícil de predecir que es esta área, debido a la gran variabilidad espacial y temporal que presenta la corriente. Estos problemas deben ser objeto de estudio con el fin de mejorar los resultados. Destacamos la importancia de avanzar en las técnicas de modelado, sobre todo en lo referente a la integración de datos lagrangianos en las ecuaciones que rigen los modelos numéricos, lo que permitiría resolver algunos de los problemas que se plantean. La serie de datos históricos de las boyas, resolvieron algunos de los problemas que no fueron resueltos por los modelos.

✓ Los resultados obtenidos en este trabajo, han estado disponibles y han servido de apoyo a instituciones de salvamento en el caso de simulación de accidentes en ejercicios prácticos, así como en el caso de accidentes reales. El disponer de una amplia base de datos de corrientes, así como de los procedimientos y herramientas de gestión descritas en este trabajo, es de especial utilidad cuando ocurren accidentes marítimos. Especialmente cuando no se dispone de información adicional por fallos en los sistemas de adquisición de datos o por problemas en las comunicaciones. En los incidentes sucedidos en 2004 y 2014, documentados en este trabajo, el disponer de información de varias boyas de deriva en la zona del accidente, aportó más información que la obtenida sólo de los modelos numéricos de predicción.

✓ La combinación de ambos sistemas el observacional y el numérico son un recurso muy útil, ambos sistemas por separado presentan una mayor incertidumbre. Gracias al conocimiento adquirido de los ejercicios realizados con los servicios de salvamento, se ha logrado un mejor nivel de precisión y de tiempos de respuesta en las predicciones. Es necesario realizar más ejercicios prácticos en la zona, para seguir entrenando el sistema y mejorar los resultados adaptados a esta área.

✓ Con todo esto, podemos concluir que la potencialidad de las boyas de deriva vendrá condicionada por los siguientes aspectos:

- En la medida que se afinen los modelos de gran escala a modelos de dimensión espacial más ajustada a los problemas encontrados, a la vez que se aumente los tipos de objeto y casos de estudio.

- Manteniendo y completando el programa de lanzamiento de boyas, sobre todo en las áreas de menor presencia, así como ampliando la sensórica incorporada en cada boya.

- Mediante la integración en sistemas de gestión operacional complejos que integren todos los datos disponibles con independencia del tipo y origen, con modelos de diversa concepción adaptándolos al área, lo que aportará información altamente valiosa.

8. BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- Allen, A. (2005). Leeway Divergence Report. US Coast Guard Research and Development Center. Report CG-D-05-05.
- Allen, A. and Plourde, J.V. (1999). Review of Leeway: Field Experiments and Implementation. US Coast Guard Research and Development Center. Report CG-D-08-99.
- Alpers, W., Brandt, P., Lazar, A., Dagorne, D., Sow, B., Faye, S., Hansen, M.W., Rubino, A., Poulain, P.M. and Brehmer, P. (2013). A small-scale oceanic eddy off the coast of West Africa studied by multi-sensor satellite and surface drifter data. *Remote Sensing of Environment* 129, 132-143.
- Álvarez-Salgado, X.A., Arístegui, J., Barton, E.D. and Hansell, D.A. (2007). Contribution of upwelling filaments to offshore carbon export in the subtropical Northeast Atlantic Ocean. *Limnology and Oceanography* 52(3), 1287-1292.
- Alves, M., Simoñes, A., Verdière, A.C. and Juliano, M. (1994). Atlas Hydrologique Optimale pour l'Atlantique Nord-Est et Centrale Nord (08–508W, 208–508N). Universidad de las Azores. 77pp.
- Alves, M., Gaillard, F., Sparrow, M., Knoll, M. and Giraud, S. (2002). Circulation patterns and transport of the Azores Front-Current system. *Deep-Sea Research Part II* 49, 3983-4002.
- Alves, M. and Verdière, C. (1999). Instability Dynamics of a Subtropical Jet and Applications to the Azores Current System: Eddy Driven Mean Flow. *Journal of Physical Oceanography* 29(5), 837-864.
- Arístegui, J., Álvarez-Salgado, X.A., Barton, E. D., Figueiras, F. G., Hernández-León, S., Roy, C. and Santos, A. M. P. (2004). Oceanography and fisheries of the Canary Current/Iberian Region of the eastern North Atlantic. *The Sea, The Global Coastal Ocean: Interdisciplinary Regional Studies and Syntheses* 23 (14), 879-933.

- Arístegui, J., Barton, E.D., Álvarez-Salgado, X. A., Santos, A. M. P., Figueiras, F. G., Kifani, S., Hernández-León, S., Mason, E., Machú, E. and Demarcq, H. (2009). Sub-regional ecosystem variability in the Canary Current upwelling. *Progress in Oceanography* 83 33-48.
- Arístegui, J., Tett, P., Hernandez Guerra, A., Basterretxea, G., Montero, M.F., Wild, K., Sangra, P., Hernandez Leon, S., Canton, M., Garcia-Braun, J.A., Pacheco, M. and Barton, E.D. (1997). The influence of island-generated eddies on chlorophyll distribution: A study of mesoscale variation around Gran Canaria. *Deep-Sea Research* 44, 71-96.
- AVISO (1998). Aviso Sea Level anomaly user's handbook. AVI-NT-011-312-CN.
- Barrera, C., Azevedo, E.B., Gelado, M.D., Rueda, M.J. and Llinás, O. (2008). Real-time monitoring network in the Macaronesian region as a contribution to the Coastal Ocean Observations Panel. *Journal of Operational Oceanography* 1, 59-72.
- Barton E.D. and Arístegui, J. (2004). The Canary Islands coastal transition zone-upwelling, eddies and filaments. *Progress in Oceanography* 62, 67-69.
- Barton, E. D., Arístegui, J., Tett, P., Cantón, M., GarcíaBraun, J., HernándezLeon, S., Nykjaer, L., Almeida, C., Almunia, J., Ballesteros, S., Basterretxea, G., Escánez, J., GarcíaWeill, L., Hernández-Guerra, A., LópezLaatzen, F., Molina, R., Montero, M.F., Navarro-Pérez, E., Rodríguez, J.M., van Lenning, K., Vélez, H. and Wild, K. (1998) The coastal transition zone of the Canary Current upwelling region. *Progress in Oceanography* 41, 3, 455-504.
- Barton, E.D., Basterretxea, G., Flament, P., Mitchelson Jacob, E.G., Jones, B., Arístegui, J. and Herrera, F. (2000). Lee region of Gran Canaria. *Journal of Geophysical Research* 105, 17173-17193.
- Basterretxea, G. (1994) Influencia de las Estructuras Oceanográficas Mesoescalares sobre la Producción Primaria en la Región Canaria. Tesis Doctoral. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

- Basterretxea, G., Barton, E.D., Tett, P., Sangra, P., Navarro-Perez, E. and Aristegui, J. (2002). Eddy and deep chlorophyll maximum response to wind-shear in the lee of Gran Canaria. *Deep-Sea Research I* 49, 1087-1101.
- Batten, M.L., Martinez, J.R., Bryan, D.W. and Buch, E.J. (2000). A modeling study of the coastal eastern boundary current system off Iberia and Morocco. *Journal of Geophysical Research* 105, 14173-14195.
- Bograd, S.J., Thomson, R.E., Rabinovich, A.B. and Leblond, P.H. (1999). Near-surface circulation of the northeast Pacific Ocean derived from WOCE-SVP satellite-tracked drifters. *Deep-Sea Research II* 46, 2371-2403.
- Bonekamp, H., Komen, G.J., Sterl, A., Janssen, P.A., Taylor, R.K. and Yelland, M.J. (2002). Statistical Comparisons of Observed and ECMWF Modeled Open Ocean Surface Drag. *Journal of Physical Oceanography* 32, 1010-1027.
- Breivik, O., Allen, A. and Maisondieu, C. (2011). Wind-induced drift of objects at sea: The leeway field method. *Applied Ocean Research* 33, 103-109.
- Brink, K.H., Beardsley, R.C., Paduan, J., Limeburner, R., Caruso, M. and Sires, J.G. (2000). A view of the 1993-1994 California Current based on surface drifters, floats and remotely sensed data. *Journal of Geophysical Research* 105 (C4), 8575-8604.
- Burrowa, M. and Thorpe, S. A. (1999). Drifter observations of the Hebrides slope current and nearby circulation patterns. *Annales Geophysicae* 17, 280-302.
- Cianca, A. (2003). Agua Central Noratlántica. Modos y variabilidad en el Atlántico Centro Oriental (ESTOC). Tesis Doctoral. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- Cianca, A., Godoy, J. M, Martin, J. M., Pérez-Marrero, J., Rueda, M. J., Llinás, O. and Neuer, S. (2012). Interannual variability of chlorophyll and the influence of low-frequency climate modes in the North Atlantic subtropical gyre. *Global Biogeochemical Cycles* 26(GB2002), 1-11.

- Cianca, A., Helmke, P., Mouriño, B., Rueda, M.J., Llinás, O. and Neuer, S. (2007). Decadal analysis of hydrography and in situ nutrient budgets in the western and eastern North Atlantic subtropical gyre. *Journal of Geophysical Research* 112 (C07025), 1-18.
- Cianca, A., Santana, R., Marrero, J.P., Rueda, M.J. and Llinás, O. (2009). Modal composition of the central water in the North Atlantic subtropical gyre. *Ocean Science Discussions* 6, 2487-2506.
- Chaigneau, A. and Pizarro, O. (2005). Mean surface circulation and mesoscale turbulent flow characteristics in the eastern South Pacific from satellite tracked drifters. *Journal of Geophysical Research* 110 (C05014), 1-17.
- Comas-Rodríguez, I., Hernández-Guerra, A., Fraile-Nuez, E., Martínez-Marrero, A., Benítez-Barrios, V.M., Pérez-Hernández, M.D. and Vélez-Belchí, P. (2011). The Azores currents system from hydrographic data. *Journal of Geophysical Research* 116 (C09021), 1-9.
- Cushman-Roisin, B. and Beckers, J.M. (2008). *Introduction to Geophysical Fluid Dynamics*. Academic Press.
- Daniel, P., Jan, G., Cabioch, F., Landau, Y. and Loiseau, E. (2002). Drift Modeling of Cargo Containers. *Spill Science & Technology Bulletin* 7(5-6), 279-288.
- Daniel, P., Josse, P. and Dandin, Ph. (2005). Further improvement of drift forecast at sea based on operational oceanography systems. *Coastal Engineering VII, Modelling, Measurements, Engineering and Management of Seas and Coastal Regions* 13-22.
- Davenport, R., Neuer, S., Hernandez-Guerra, A., Rueda, M.J., Llinas, O., Fischer, G. and Wefer, G.(1999). Seasonal and interannual pigment concentration in the Canary Islands region from CZCS data and comparison with observations from the ESTOC. *International Journal of Remote Sensing* 20 (7), 1419-1433.
- Davis, R.E. (1985). Drifter Observations of Coastal Surface Current During CODE: The Method and Descriptive View. *Journal of Geophysical Research* 90 (C3), 4741-4755.

- Eden, C. and Dietze, H. (2009). Effects of meso-scale eddy/wind interaction on biological new production and eddy kinetic energy. *Journal of Geophysical Research* 114 (C05023), 1-13.
- Ekman, V.W. (1905). On the Influence of the Earth's Rotation on Ocean-Currents. *Arkiv foer Matematik, Astronomi och Fysik* 2, 11.
- Emery, W.J. and Thomson, R.E. (2004). *Data analysis methods in Physical Oceanography*. Elsevier. 638 pp.
- Fedoseev, A. (1970). Geostrophic Circulation of Surface Waters on the Shelf of North-West Africa. *Conseil International pour l'Exploration de la Mer. Rapports et Procès-Verbaux des Réunions* 159, 32-37.
- Fraile-Nuez, E., Machín, F., Vélez-Belchí, P., López-Laatzén, F., Borges, R., Benítez-Barrios, V. and Hernández-Guerra, A. (2010). Nine years of mass transport data in the Eastern boundary of the North Atlantic Subtropical Gyre. *Journal of Geophysical Research* 115 (C09009), 1-15.
- Fratantoni, D.M. (2001). North Atlantic surface circulation during the 1990's observed with satellite-tracked drifters. *Journal of Geophysical Research* 106 (C10), 22,067-22,093.
- García-Sotillo, M. (2012). MyOcean. Sistema de Información Marítimo Europeo. Workshop RAI.A.co para desarrolladores Aplicaciones para móviles y web.
- García-Weil, L., Luque-Solheim, A., Tejera-Cruz, A. and Bergasa-López, O. (2003). Long live anticyclonic eddies generated in the Canary Islands during 1998 as observed by infrared and altimeter satellite data. *IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing* 5, 3398-3400.
- García-Weil, L., Luque-Söllheim, A., Tejera-Cruz, A., Bergasa-López, A. and Cárdenes, J. (2005). Análisis de la asimetría de los remolinos generados por el Archipiélago Canario a partir de datos de satélite. *XI Congreso Nacional de Teledetección* 201-204.

- García-Weil, L., Suárez, D., Cardona, L., Barrera, C., Maroto, L., Pérez, J., Tejera, A., Llinás, O. and Iribar, M. (2007). Análisis de fenómenos mesoescalares en la región canaria utilizando datos de teledetección y boyas a la deriva. Teledetección. Herramienta para la gestión sostenible. ISBN: 978-987-543-127-0.
- García-Weil, L., Tejera- Cruz, A. and Cárdenes, J. (2006). Characteristics of the sea surface circulation in canary waters as observed through metop and other sources of remote sensing data. European Space Agency SP-618.
- García-Weil, L., Tejera Cruz, A., Cárdenes Jiménez, J., Maroto, L., Pérez, J. and Luque-Sölheim, A. (2006). Análisis combinado de datos de satélite de sensores pasivos y activos en el seguimiento de los remolinos generados en las Islas Canarias. Revista de Teledetección 26, 25-29.
- Garraffo, Z. D., Mariano, A. J., Griffa, A., Veneziani, C. and Chassignet, E.P. (2001). Lagrangian data in a high-resolution numerical simulation of the North Atlantic I. Comparison with in situ drifter data, Journal of Marine Systems 29, 157-176.
- Garraffo, Z. D., Griffa, A., Mariano, A. J., and Chassignet, E.P. (2001). Lagrangian data in a high-resolution numerical simulation of the North Atlantic II. On the pseudo-Eulerian averaging of Lagrangian data. Journal of Marine Systems 29, 177-200.
- Gasser, M., Salvador, J., Sangrá, P. and Pelegrí, J.L. (2001). Fiel validation of a semi-spherical Lagrangian drifter. Scientia Marina 65, 139-143.
- Geernaert, G.L., Hansen, F., Courtney, M. and Herbers, T. (1993). Directional Attributes of the Ocean Surface Wind Stress Vector. Journal of Geophysical Research 98(C9), 16,571-16,582.
- Gelado, M.D., Rodríguez, M.J., Hernández, J.J., Azevedo, E.B., Llinás, O., Collado, C., Cardona, P. and López, P. (2005). Dust deposition fluxes to northeastern subtropical Atlantic (Canary Islands). Geophysical Research Abstracts 7, 08399.
- González-Muñoz, A. (1995). Análisis de la variabilidad espacio temporal del afloramiento del Noroeste africano. Tesis Doctoral. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

- González-Muñoz, A., Pérez-Martell, E. and Llinás, O. (1996). Estudio de la distribución de los vientos entre las Islas Canarias y cabo Blanco. Resultados preliminares. *Oceanografía y Recursos Marinos en el Atlántico Centro-Oriental* 45-68.
- González-Dávila, M., Santana-Casiano, J.M., Rueda, M.J., Llinás, O. and González-Dávila, E.F. (2003) Seasonal and interannual variability of sea-surface carbon dioxide species at the European Station for Time Series in the Ocean at the Canary Islands (ESTOC) between 1996 and 2000. *Global Biogeochemical Cycles* 17(3), 2-1,2-5.
- González-Dávila, M., Santana-Casiano, J.M., Rueda, M.J. and Llinás, O. (2010). The water column distribution of carbonate system variables at the ESTOC site from 1995 to 2004. *Biogeosciences* 7, 3067-3081.
- Griffa, A., Lumpkin, R. and Veneziani, M. (2008). Cyclonic and anticyclonic motion in the upper ocean. *Geophysical Research letters* 35, L01608, 1-5.
- Hansen, D.V. and Herman, A. (1989). Temporal Sampling Requirements for Surface Drifting Buoys in the Tropical Pacific. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 6, 599-607.
- Hansen, D.V. and Poulain, P.M. (1996). Quality Control and Interpolations of WOCE-TOGA Drifter Data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 13, 900-909.
- Haynes, R. and Barton, E.D. (1991). Lagrangian Observations in the Iberian Coastal Transition Zone. *Journal of Geophysical Research* 96(C8), 14.731-14.741.
- Hernández-Guerra, A., Arístegui, J., Cantón, M. and Nykjaer, L. (1993). Phytoplankton pigment patterns in the Canary Islands area as determined by using CZCS data. *International Journal of Remote Sensing* 14, 1431-1437.
- Hernández-Guerra, A., López-Laatzén, F., Machín, F., Armas, D. and Pelegrí, J.L. (2001). Water masses, circulation and transport in the eastern boundary current of the North Atlantic subtropical gyre. *Scientia Marina* 65(Suppl.1), 177-186.

- Hernández-Guerra, A., Fraile-Nuez, E., Borges, R., López-Laatzén, F., Vélez-Belchí, P., Parrilla, G. and Müller, T. J. (2003). Transport variability in the Lanzarote passage (eastern boundary current of the North Atlantic Subtropical Gyre). *Deep-Sea Research I* 50, 189-200.
- Hernández-Guerra, A., Fraile-Nuez, E., López-Laatzén, F., Martínez, A., Parrilla, G. and Vélez-Belchí, P. (2005). Canary Current and North Equatorial Current from an inverse box model. *Journal of Geophysical Research* 110 (C12), 1-16.
- Ishikawa, K., Imawaki, S. and Ishii, H. (1995). Comparison of Surface Velocities Determined from Altimeter and Drifting Buoy Data. *Journal of Oceanography* 51, 729-740.
- Ishikawa, Y., Awaji, T. and Akitomo, K. (1997). Global Surface Circulation and Its Kinetic Energy Distribution Derived from Drifting Buoys. *Journal of Oceanography* 53, 489-516.
- Jakobsen, P.K., Ribergaard, M.H., Quadfasel, D., Schmith, T. and Hughes, C.W. (2003). The near surface circulation in the Northern North Atlantic as inferred from Lagrangian drifters: variability from mesoscale to interannual. *Journal of Geophysical Research* 108 (C8), 7,1- 7,14.
- Jiménez, B., Sangrà, P. and Mason, E. (2008). A numerical study of the relative importance of wind and topographic forcing on oceanic eddy shedding by tall, deep-water islands. *Ocean Modelling* 22, 146–157.
- Johnson, J. and Stevens, I. (2000). A fine resolution model of the eastern North Atlantic between the Azores, the Canary Islands and the Gibraltar Strait. *Deep-Sea Research* 47, 875-899.
- Juliano, M. F. (2003). Determination and Analysis of the three-dimensional Atlantic Ocean Circulation and Climate. An Integrated Vision. Doctoral Thesis. University of the Azores.
- Juliano, M.F. and Alves, M. (2007). The Atlantic Subtropical Front/Current Systems of Azores and St. Helena. *Journal of Physical Oceanography* 37, 2573- 2598

- Juliano, M.F., Alves, M., Simões, A. and Rodeia, J. (2006). 15 Years of Oceanography in the Azores: From Oceanographic Cruises to an Integrated Approach. European Space Agency SP-07.
- Karl, D.M., Bates, N., Emerson, S., Harrison, P.J., Jeandel, C., Llinás, O., Liu, K.K., Marty, J.C., Michaels, A.F., Miquel, J.C., Neuer, S., Nojiri, Y. and Wong, C.S. (2003) Temporal studies of biogeochemical processes determined from ocean time series observations during the JGOFS era. *Ocean Biogeochemistry* 239-265.
- Käse, R.H., Price, J.F., Richardson, P.L. and Zenk, W. (1986). A quasi-synoptic survey of the thermocline circulation and water mass distribution within the Canary Basin. *Journal of Geophysical Research* 91, 9739-9748.
- Käse, R.H. and Siedler, G. (1982). Meandering of the subtropical front southeast of the Azores. *Nature* 300, 245-246.
- Käse, R.H., Zenk, W., Sanford, T.B. and Hiller, W. (1985). Currents, Fronts and Eddy Fluxes in the Canary Basin. *Progress in Oceanography* 14, 231-257.
- Kennen, S.C., Niiler, P.P. and Sybrandy, A. (1998). Advances in Drifting Buoy Technology. *International WOCE Newsletter* n°30.
- Kirwan, A. D. and Chang, M. S. (1979). Effect of sampling rate and random position error on analysis of drifter data. *Journal of Physical Oceanography* 9(2), 382-387.
- Kirwan, A.D., McNally, Jr.G., Chang, M.S. and Molinari, R. (1975). The Effect of Wind and Surface Currents on Drifters. *Journal of Physical Oceanography* 5, 361-368.
- Kirwan, A.D., MacNally, G. and Pazan, S. (1978). Wind Drag and Relative Separations of Undrogued Drifters. *Journal of Physical Oceanography* 8, 1146-1152.
- Kirwan, A.D., MacNally, G.J., Reyna, E. and Merrell, W.J. (1978). The Near-Surface Circulation of the Eastern North Pacific. *Journal of Physical Oceanography* 8, 937-945.

- Kelly, K.A., Beardsley, R.C., Limeburner, R., Brink, K.H, Paduan, J.D. and Chereskin, T.K. (1998). Variability of the near-surface eddy kinetic energy in the California Current based on altimetric, drifter, and moored current data. *Journal Geophysical Research* 103(C6), 13067-13083.
- Klein B. and Siedler, G. (1989). On the origin of the Azores Current. *Journal of Geophysical Research* 94, 6159-6168.
- Knoll, M., Hernández-Guerra, A., Lenz, B., López Laatzen, F., Machín, F., Müller, T.J. and Siedler, G. (2002). The Eastern Boundary Current system between the Canary Islands and the African Coast. *Deep-Sea Research II* 49, 3427-3440.
- Knoll, M., Müller, T.J. and Siedler, G. (1998). ESTOC/CANIGO cruises with FS Poseidon cruise 202/1, 212, 233, 237/3. *Berichte aus dem Institut für Meereskunde and der Christian-Albrechts-Universität. Kiel* 302, 78 pp.
- Krauss, W. and Böning, C. W. (1987). Lagrangian properties of eddy fields in the northern North Atlantic as deduced from satellite-tracked buoys. *Journal of Marine Research* 45, 259-291.
- Krauss, W., Dengg, J. and Hinrichsen, H.H. (1989). The response of drifting buoys to currents and wind. *Journal Geophysical Research* 94(C3), 3201-3210.
- LaCasce, J. H. (2005). On the Eulerian and Lagrangian velocity distributions in the North Atlantic, *Journal of Physical Oceanography* 35, 2327-2336.
- LaCasce, J. H. (2008). Statistics from Lagrangian observations. *Progress in Oceanography* 77(1), 1-29.
- Lagerloef, G.S., Mitchum, G.T., Lukas, R.B. and Nüiler, P.P. (1999). Tropical Pacific near surface currents estimated from altimeter, wind and drifter data. *Journal of Geophysical Research* 104(C10), 23,313-23,326.
- Lasternas, S., Piedeleu, M., Sangrá, P., Duarte, C. M. and Agustí, S. (2013). Forcing of dissolved organic carbon release by phytoplankton by anticyclonic mesoscale eddies in the subtropical NE Atlantic Ocean. *Biogeosciences* 10, 2129-2143.

- Lee, D.K., Niiler, P.P. and Suk, M.S. (2001). Comparison of Ocean Currents Observed from Drifters and TP/ERS in the East Sea. *Ocean and Polar Research* 23(2), 133-139.
- Levitus, S. (1982). Climatological atlas of the world ocean. NOAA Professional Paper 13, 173pp.
- Llinás, O. and Rueda, M.J. (2008). EL mar de Canarias. Mares de España. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 92-107.
- Llinás, O., Rueda, M.J., Pérez-Marrero, J., Pérez-Martell, E., Santana, R., Villagarcía, M.G., Cianca, A., Godoy, J. and Maroto, L. (2002). Variability of the Antarctic Intermediate Waters in the Northern Canary Box. *Deep-Sea Research II* 49, 3441-3453.
- Llinás, O., Rueda, M.J. and Pérez-Martell, E. (1994). Temperature, salinity and nutrient characteristics in waters of the Canary Island insular shelf at the end of spring. *Boletín Instituto Español de Oceanografía* 10(2), 177-189.
- Llinás, O., Rueda, M.J. and Pérez-Martell, E. (1993). Variability of oceanographic parameters in Canary Island waters. *Boletín Instituto Español de Oceanografía* 9, 89-100.
- Llinás, O., Rodriguez-León, A., Siedler, G. and Wefer, G. (1994). The ESTOC time series station started operation. *International WOCE Newsletter* nº 17.
- Lumpkin, R. (2003). Decomposition of surface drifter observations in the Atlantic Ocean. *Geophysical Research Letters* 30 (14), 1753.
- Lumpkin R. and Garraffo, Z. (2005). Evaluating the Decomposition of Tropical Atlantic Drifter Observations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 22, 1403-1415.
- Lumpkin, R. and Garzoli, S.L. (2005). Near-surface circulation in the Tropical Atlantic Ocean. *Deep-Sea Research I* 52, 495-518.
- Lumpkin, R., Grodsky, S., Rio, M.H., Centurioni, L., Carton, J and Lee, D. (2013). Removing spurious low-frequency variability in surface drifter velocities. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 30 (2), 353-360.

- Lumpkin, R. and Johnson, G.C. (2013). Global ocean surface velocities from drifters: Mean, variance, El Niño-Southern Oscillation response, and seasonal cycle. *Journal of Geophysical Research* 118, 2992-3006.
- Machín, F., Hernández-Guerra, A. and Pelegrí, J.L. (2006). Mass fluxes in the Canary Basin. *Progress in Oceanography* 70, 416-447.
- Machin, F. and Pelegrí, J. L. (2009). Northward Penetration of Antarctic Intermediate Water off Northwest Africa. *Journal of Physical Oceanography* 39(3), 512-535.
- Maillard, C. and Käse, R. (1989). The near-surface flow in the sub-tropical gyre south of the Azores. *Journal of Geophysical Research* 94, 16133-16140.
- Mariano, A. J., Griffa, A., Özgökmen, T. M. and Zambianchi, E. (2002). Lagrangian Analysis and Predictability of Coastal and Ocean Dynamics 2000. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 19(7), 1114-1126.
- Martins, C.S., Hamann, M. and Fiúza, A.F. (2002). Surface circulation in the eastern North Atlantic, from drifters and altimetry. *Journal of Geophysical Research* 107 (C12), 10-1, 10-15.
- McClean, J.L., Poulain, P.M., Pelton, J.W. and Maltrud, M.E. (2002). Eulerian and lagrangian statistics from surface drifters and a high-resolution POP simulation in the North Atlantic. *Journal of Physical Oceanography* 32(9), 2472-2491.
- McGillicuddy, D. J., Johnson, R., Siegel, D. A., Michaels, A. F., Bates, N. R. and Knap, A. H. (1999). Mesoscale variations of biogeochemical properties in the Sargasso Sea. *Journal of Geophysical Research* 104(C6), 13,381–13,394.
- McGillicuddy, D.J., Anderson, L.A., Bates, N.R., Bibby, T., Buesseler, K.O., Carlson, C.A., Davis, C.S., Ewart, C., Falkowski, P.G., Goldthwait, S.A., Hansell, D.A., Jenkins, W.J., Johnson, R., Kosnyrev, V.K., Ledwell, J.R., Li, Q.P., Siegel, D.A. and Steinberg, D.K. (2007). Eddy/Wind Interactions Stimulate Extraordinary Mid-Ocean Plankton Blooms. *Science*, 316, 1021-1026.

- McPhaden, M. J., Hansen, D. V. and Richardson, P. L. (1991). A Comparison of ship drift, drifting buoy, and current meter mooring velocities in the Pacific South Equatorial Current. *Journal of Geophysical Research-Oceans* 96(C1), 775-781.
- Meurs, P. and Niiler, P.P. (1997). Temporal Variability of the Large-Scale Geostrophic Surface Velocity in the Northeast Pacific. *Journal of Physical Oceanography* 27(10), 2288-2297.
- Mittelstaedt, E. (1983). The upwelling area of Northwest Africa: A description of phenomena related to coastal upwelling. *Progress in Oceanography* 12, 307-331.
- Mittelstaedt, E. (1991). The ocean boundary along the northwest African coast: circulation and oceanographic properties at the sea surface. *Progress in Oceanography* 26 (4), 307-355.
- Molina, R. (1976). Consideraciones sobre la corriente de Canarias. 11 Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica 3, 1567-1588.
- Molina, R., Cabanas, J.M. and Laatzén, F.L. (1996). Corrientes e hidrografía en la región de Canarias. Campaña Canarias 9205. *Boletín Instituto Español de Oceanografía*. 12(1), 43-51.
- Molina, R. and Laatzén, F.L. (1986). Corrientes en la región comprendida entre las islas Canarias orientales, Marruecos y las islas Madeira. Campaña 'Norcanarias I'. *Revista de Geofísica* 42, 41-52.
- Monterey, G. and Levitus, S. (1997). Seasonal Variability of Mixed Layer Depth for the World Ocean. NOAA Atlas NESDIS 14. 87pp.
- Müller, T.J. and Siedler, G. (1992). Multi-year current time series in the eastern North Atlantic Ocean. *Journal of Marine Research* 50, 63-98.
- Müller, T.J., Xu, J., Llinás, O. and Pérez-Martell, E. (1990). Hydrographic and Current Observations in the North-East Atlantic Ocean. *Bulletin Inst. Meereskunde Kiel* 202.

- Munk, W.H. (1955). On the Wind-Driven Ocean Circulation. *Journal of Meteorology* 7(2), 79-93.
- Navarro-Pérez, E. and Barton, E.D. (2001). Seasonal and interannual variability of the Canary Current. *Scientia Marina* 65 (suppl. 1), 205-213.
- Neuer, S., Cianca, A., Helmke, P., Freudenthal, T., Davenport, R., Meggers, H., Knoll, M., Santana-Casiano, J.M., González-Dávila, M., Rueda, M.J. and Llinás, O. (2007). Biogeochemistry and hydrography in the eastern subtropical North Atlantic gyre. Results from the European time-series station ESTOC. *Progress in Oceanography* 72(1), 1–29.
- Neuer, S., Davenport, R., Freudenthal, T., Wefer, G., Llinás, O., Rueda, M.J., Steinberg, D.K. and Karl, D.M. (2002). Differences in the biological carbon pump at three subtropical ocean sites. *Geophysical Research Letters* 29(18), 32,1-32,4.
- Neuer, S. and Rueda, M.J. (1997). European Time Series Station in Operation North of Canary Islands. *U.S. JGOFS Newsletter* 8, 9; 15.
- Neuer, S., Torres-Padrón, M.E., Gelado-Caballero, M. D., Rueda, M. J., Hernández- Brito, J., Davenport, R. and Wefer, G. (2004). Dust deposition pulses to the eastern subtropical North Atlantic gyre: Does ocean's biogeochemistry respond?. *Global Biogeochemical Cycles* 18(GB4020), 1-10.
- Nieto Saavedra, K. (2009). Variabilidad Oceánica de Mesoescala en los Ecosistemas de Afloramiento de Chile y Canarias: una comparación a partir de datos satelitales. Tesis Doctoral. Universidad de Salamanca.
- Niiler, P.P. (1995). Global Drifter Program: Measurements of Velocity, SST and Atmospheric Pressure. *International WOCE Newsletter* n°20, 3-6.
- Niiler, P.P., Davis, R.E. and White, H.J. (1987). Water-following characteristics of a mixed layer drifter. *Deep-Sea Research* 34(11), 1867-1881.
- Niiler, P.P. and Paduan, J.D. (1995). Wind-Driven Motions in the Northeast Pacific as Measured by Lagrangian Drifters. *Journal of Physical Oceanography* 25, 2819-2830.

- Niiler, P.P., Sybrandy, A.S., Bi, K., Poulain, P.M. and Bitterman, D. (1995). Measurements of the water-following capability of holey-sock and TRISTAR drifters. *Deep-Sea Research I* 42 (11/12), 1951-1964.
- Olbers, D.J., Wenzel, M. and Willebrand, J. (1985). The inference of North Atlantic circulation patterns from climatological hydrographic data. *Reviews of Geophysics* 23, 313-356.
- Oliver, M.A. (1996). Kriging: a method of estimation for environmental and rare disease data. *Geological Society* 113, 245-254.
- Otto L. and Van Aken, H.M. (1996). Surface circulation in the northeast Atlantic as observed with drifters. *Deep-Sea Research I* 43(4), 467-499.
- Özgökmen, T. M., Griffa, A., Mariano, A. J. and Piterbarg, L. I. (2000). On the predictability of Lagrangian trajectories in the ocean. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 17(3), 366-383.
- Özgökmen, T. M., Molcard, A., Chin, T.M., Piterbarg, L.I. and Griffa, A. (2003). Assimilation of drifter observations in primitive equation models of mid latitude ocean circulation. *Journal of Geophysical Research-Oceans* 108(C7), 31-1, 31-17.
- Özgökmen, T.M., Piterbarg, L.I., Mariano, A.J. and Ryan, E.H. (2001). Predictability of Drifter Trajectories in the Tropical Pacific Ocean. *Journal of Physical Oceanography* 31, 2691-2720.
- Paduan, J.D. and Niiler, P.P. (1993). Structure of Velocity and Temperature in the Northeast Pacific as Measured with Lagrangian Drifters in Fall 1987. *Journal of Physical Oceanography* 23, 585-600.
- Paillet, J. (1999). Central Water Vortices of the Eastern North Atlantic. *Journal of Physical Oceanography* 29, 2487-2503.
- Pätsch, J., Kühn, W., Radach, G., Sanatana-Casiano, J.M., González-Dávila, M. and Llinás, O. (2000). Variability of carbon fluxes during ten biogeochemical annual cycles at the Atlantic station ESTOC. *Deep-Sea Research II* 49, 253-288.

- Pazan, S. E. (1996). Intercomparison of drogued and undrogued drift buoys. *Oceans'96 MTS/IEEE: Prospects for the 21st Century*, 864-872.
- Pazan, S.E. and Niiler, P.P. (2001). Recovery of Near-Surface Velocity from Undrogued Drifters. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 18, 476-489.
- Pazan, S.E. and Niiler, P.P. (2004). New Global Drifter Data Set Available. *EOS* 85, n°2.
- Pelegri, J.L., Arístegui, J., Cana, L., González-Dávila, M., Hernández-Guerra, A., Hernández-León, S., Marrero-Díaz, A., Montero, M.F., Sangrà, P. and Santana-Casiano, M. (2005). Coupling between the open ocean and the coastal upwelling region off northwest Africa: water recirculation and offshore pumping of organic matter. *Journal of Marine Systems* 54, 3 – 37.
- Percival, D.B. and Walden, A.T. (2000). *Wavelet methods for time series analysis*. Cambridge University Press, 594 pp
- Pérez, F.F., Mintrop, L., Llinás, O., González-Dávila, M., Castro, C.G., Álvarez, M., Koertzing, A., Santana-Casiano, J.M. and Ríos, A.F. (2001). Mixing analysis of nutrients, oxygen and inorganic carbon in the Canary Islands region. *Journal of Marine Systems* 28, 183-201.
- Pérez-Marrero, J. (1998). *Aplicación de la Radiometría Infrarroja a las Observaciones Oceanográficas en el Atlántico Centro Oriental*. Tesis Doctoral. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- Pérez-Marrero, J., Llinás, O., Maroto, L., Rueda, M.J. and Cianca, A. (2002). Saharan dust storms over the Canary Islands during winter 1998 as depicted from the advanced very high-resolution radiometer. *Deep-Sea Research II* 49, 3465-3479.
- Pérez-Marrero, J., Llinás, O., Maroto, L., Cardona, L., Rueda, M.J., Barrera, C. and Villagarcía, M. (2005). Una herramienta para la fusión de datos oceanográficos obtenidos mediante satélites. *Teledetección, avances en observación de La Tierra*, 167-170.

- Pérez-Marrero, J., Maroto, L., Llinás, O., Rueda, M.J., Tejera, A., Godoy, J. and Barrera, C. (2006). Integración de observaciones remotas y modelos hidrodinámicos para el estudio de la dispersión de contaminantes en el mar. *Revista de Teledetección* 26, 60-40.
- Pérez-Martell, E. (1988). Interacción vientos-corrientes en profundidades reducidas. Un modelo para la costa este de Gran Canaria. Tesis Doctoral. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- Pérez-Martell, E., Llinás, O., Onken, R. and Zenk, W. (1996). Variabilidad térmica del agua central noratlántica entre Gran Canaria y el Talud Sahariano. Resultados Preliminares. *Oceanografía y Recursos Marinos en el Atlántico Centro-Oriental*, 29-35.
- Pérez-Vallazza, C., Álvarez-Vázquez, R., Cardona, L., Pintado, C. and Hernández-Brito, J. (2008). Cetacean diversity at the west coast of La Palma Island (Canary Islands). *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 88(6), 1289-1296.
- Peterson, R.G., Stramma, L. and Kortum, G. (1996). Early concepts and charts of ocean circulation. *Progress in Oceanography* 37, 1-115.
- Piedeleu, M., Sangrà, P., Sánchez-Vidal, A., Fabrés, J., Gordo, C. and Calafat, A. (2009). An observational study of oceanic eddy generation mechanisms by tall deep-water islands (Gran Canaria). *Geophysical Research letters* 36(L14605), 1-5.
- Pickard, G.L. (1968). *Descriptive physical Oceanography* (Trans. da Silva P.M.). Pergamon. 180 pp.
- Pickard, G.L. and Emery, W.J. (1982). *Descriptive physical Oceanography*. Pergamon. 249pp.
- Pingree, R. and García-Soto, C. (2004). Annual westward propagating anomalies near 26°N and eddy generation south of the Canary Islands: remote sensing and in situ measurement. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 84, 4574/1-11.

- Pond, S. and Pickard, G.L. (1983). *Introductory Dynamic oceanography*. Pergamon. 329 pp
- Poulain, P.M. (2001). Adriatic Sea surface circulation as derived from drifter data between 1990 and 1999. *Journal of Marine System* 29, 3-32.
- Poulain, P.M., Gerin, R., Mauri, E. and Pennel, R. (2009). Wind Effects on Drogued and Undrogued Drifters in the Eastern Mediterranean. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 26, 1144-1156.
- Poulain, P.M. and Niiler, P.P. (1989). Statistical Analysis of the Surface Circulation in the California Current System Using Satellite-Tracked Drifters. *Journal of Physical Oceanography* 19, 1588-1603.
- Poulain, P.M., Warn-Varnas, A. and Niiler, P.P. (1996). Near-surface circulation of the Nordic seas as measured by Lagrangian drifters. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 101(C8), 18237-18258.
- Ralph, E.A. and Niiler, P.P. (1999). Wind-Driven Currents in the tropical Pacific. *Journal of Physical Oceanography* 29, 2121-2129.
- Reynolds, W.C. (1976). Computation of turbulent flows. *Annual Review of Fluid Mechanics* 8, 182-208.
- Reverdin, G., Niiler, P.P. and Valdimarsson, H. (2003). North Atlantic Ocean surface currents. *Journal of Geophysical Research* 108(C1), 2,1-2, 2.
- Rio, M.H. (2012). Use of Altimeter and Wind Data to Detect the Anomalous Loss of SVP-Type Drifter's Drogue. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 29, 1663-1674.
- Rio, M.H. and Hernández, F. (2003). High-frequency response of wind-driven currents measured by drifting buoys and altimetry over the world ocean. *Journal of Geophysical Research* 108(C8), 39-1, 39-19.
- Richardson, P.L. (1983). Eddy Kinetic Energy in the North Atlantic From Surface Drifters. *Journal of Geophysical Research* 88 (C7), 4355-4367.

- Richardson, P.L. (1981). Gulf Stream Trajectories Measured with Free-Drifting Buoys. *Journal of Physical Oceanography* 11, 999-1010.
- Richardson, P.L. and Tychensky, A. (1998). Meddy trajectories in the Canary Basin measured during the SEMAPHORE experiment, 1993-1995. *Journal of Geophysical Research* 103, 25029-25045.
- Richardson, P.L. and Walsh, D. (1986). Mapping Climatological Seasonal Variations of Surface Currents in the Tropical Atlantic Using Ship Drifts. *Journal of Geophysical Research* 91(C9), 10,537-10,550.
- Rudnick, D.L. and Perry, M.J. (2003). ALPS: Autonomous and Lagrangian Platforms and Sensors. Workshop Report. 64 pp.
- Russ, E.D. (1985). Drifter Observations of Coastal Surface Currents During CODE: The Method and Descriptive View. *Journal of Geophysical Research* 90(C3), 4741-4755.
- Saji, P.K., Shenoi, S. C., Almeida, A. and Rap, G. (2000). Inertial currents in the Indian Ocean derived from satellite tracked surface drifters. *Oceanologica Acta* 23(5), 635-640.
- Salas, J., García-Ladona, E. and Font, J. (2001). Statistical analysis of the surface circulation in the Algerian Current using Lagrangian Buoys. *Journal of Marine System* 29, 69-85.
- Sanderson, B. G. (1995). Structure of an eddy measured with drifters. *Journal of Geophysical Research-Oceans* 100(C4), 6761-6776.
- Sangrà, P. (1995). Perturbación de un flujo geofísico por un obstáculo: aplicación a la Isla de Gran Canaria. Tesis Doctoral. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- Sangrà, P., Auladell, M., Marrero-Díaz, A., Pelegrí, J.L., Fraile-Nuez, E., Rodríguez-Santana, A., Martín, J.M., Mason, E. and Hernández-Guerra, A. (2007). On the nature of oceanic eddies shed by the Island of Gran Canaria. *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers* 54(5), 687-709.

- Sangrà, P., Pascual, A., Rodríguez-Santana, A., Machín, F., Mason, E., McWilliams, J.C., Pelegrí, J.L., Dong, C., Rubio, A., Arístegui, J., Marrero-Díaz, A., Hernández-Guerra, A., Martínez-Marrero, A. and Auladell, M. (2009). The Canary Eddy Corridor: A major pathway for long-lived eddies in the subtropical North Atlantic, Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers 56 (12), 2100-2114.
- Sangrà, P., Pelegrí, J. L., Hernández-Guerra, A., Arregui, I., Martín, J. M., Marrero-Díaz, A., Martínez, A., Ratsimandresy, A.W. and Rodríguez-Santana, A. (2005). Life history of an anticyclonic eddy. *Journal of Geophysical Research* 110 (C03021), 1-19.
- Santana-Casiano, M.J., González-Dávila, M., Rueda, M.J., Llinás, O. and González-Dávila, E.F. (2007). The interannual variability of oceanic CO₂ parameters in the northeast Atlantic subtropical gyre at the ESTOC site. *Global Biogeochemical Cycles* 21, (GB1015), 1-16.
- Santana, M.R. (1999). Nutrientes y termoclinas en la Estación Europea de Series Temporales Oceánicas de Canarias. Tesis Doctoral. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- Siedler, G. and Llinás, O. (1999). Time Series: Five years of ESTOC station operation. *Goos News* 7, 3-5.
- Sombardier, L. and Niiler, P.P. (1994). Global Surface Circulation Measured by Lagrangian Drifters. *Sea Technology* 21-24.
- Stommel, H. (1948). The Westward Intensification of Wind-Driven Ocean Currents. *American Geophysical Union* 29 (2).
- Stramma, L., (1984). Geostrophic transport in the warm water sphere of the eastern subtropical North Atlantic. *Journal of Marine Research* 42, 537–558.
- Stramma, L., Hüttl, S. and Schafstall, J. (2005). Water masses and currents in the upper tropical northeast Atlantic off northwest Africa. *Journal of Geophysical Research* 110 (C12006), 1-18.
- Stramma, L. and Müller, T. (1989). Some observations of the Azores Current and the North Equatorial Current. *Journal of Geophysical Research* 94, 3181-3186.

- Stramma, L. and Siedler, G. (1988). Seasonal changes in the North Atlantic Subtropical Gyre. *Journal of Geophysical Research* 93, 8111-8118.
- Stutzer, S. and Krauss, W. (1998). Mean circulation and transports in the South Atlantic Ocean: Combining model and drifter data. *Journal of Geophysical Research-Oceans* 103(C13), 30,985-31,002.
- Sudre, J. and Morrow, R. A. (2008). Global surface currents: a high-resolution product for investigating ocean dynamics. *Ocean Dynamics* 58(2), 101-118.
- Sybrandy, A.L. and Niiler, P.P. (1992) WOCE/TOGA Lagrangian drifter construction manual. WOCE Rep. 63, SIO Ref. 91/6.
- Sybrandy, A.L., Niiler, P.P. and Sobardier, L. (1992). Technical Improvements to the WOCE/TOGA Lagrangian Drifter. OCEANS '92. 'Mastering the Oceans 1- 2, 718-721.
- Taylor, G.I. (1921). Diffusion by continuous movements. *Proceedings of the London Mathematical Society* 2, 20 196-212.
- Tejera, A., García-Weil, L., Heywood, K. J. and Cantón-Garbín, M. (2002). Observations of oceanic mesoscale features and variability in the Canary Islands area from ERS-1 altimeter data, satellite infrared imagery and hydrographic measurements. *International Journal of Remote Sensing* 23 (22), 4897-4916
- Tomczak, M. (1981). Longshore advection during an upwelling event in the Canary Current area as detected by airborne radiometer. *Oceanologica Acta* 4, 161-169.
- Tomczak, M. and Godfrey, J.S. (1994). *Regional oceanography: An introduction*. Pergamon. 422pp
- Tomczak, M. and Godfrey, J.S. (2003). *Regional Oceanography: an Introduction*. 2nd improved edition. Pergamon.
- Tomczak, M. and Hughes, P. (1980). Three dimensional variability of water masses and currents in the Canary upwelling region. "Meteor" *Forsch-Ergebnisse. Reihe A.*, 21, 1-24.

- Torres-Padrón, M.E., Gelado-Caballero, M.D., Collado-Sánchez, C., Siruela-Matos, V.F., Cardona-Castellano, P.F. and Hernández-Brito, J.J. (2002). Variability of dust inputs to the CANIGO zone. *Deep-Sea Research II* 49, 3455–3464.
- Troupin, C., Sangrà, P. and Arístegui, J. (2010). Seasonal variability of the oceanic upper layer and its modulation of biological cycles in the Canary Island region. *Journal of Marine Systems* 80, 172–183.
- Uchida, H. and Imawaki, S. (2003). Eulerian mean surface velocity field derived by combining drifter and satellite altimeter data. *Geophysical Research Letters* 30(5), 1229-1262.
- Uchida, H., Imawaki, S. and Hu, J.H. (1998). Comparison of Kuroshio Surface Velocities Derived from Satellite Altimeter and Drifting Buoy Data. *Journal of Oceanography* 54, 115-122.
- UNESCO (1998). Guide to Drifting Data Buoys. IOC/WMO Manual and Guides 20.
- UNESCO (2002). Global Drifting buoy observations ADCP Implementation Strategy. IOC/WMO Data Buoy Cooperation Panel. DBCP Technical Document 15.
- Van Aken, H.M. (2002). Surface currents in the Bay of Biscay as observed with drifters between 1995 and 1999. *Deep-Sea Research I* 49, 1071-1086.
- Van Camp, L., Nykjaer, L., Mittelstaedt, E. and Schlittenhardt, P. (1991). Upwelling and boundary circulation off northwest Africa as depicted by infrared and visible satellite observations. *Progress in Oceanography* 26, 357-402.
- Velasco Fuentes, O.U. and Marinone, S.G. (1999). A numerical study of the Lagrangian circulation in the Gulf of California. *Journal of Marine System* 22, 1-12.
- Villagarcía, M.G., Llinás, O., Reuter, R., Rueda, M.J., Zielinski, O. and Godoy, J. (2002). Distribution of gelbstoff fluorescence in the Northern Canary Box. *Deep-Sea Research II* 49, 3497-3511.

- Wilkerson, J.C. and Earle, M.D. (1990). A Study of Differences Between Environmental Reports by Ships in the Voluntary Observing Program and Measurements From NOAA Buoys. *Journal of Geophysical Research* 95 (C3), 3373-3385.
- Wooster, W.S., Bakum, A. and McLain, D.R. (1976). The seasonal upwelling cycle along the eastern boundary of the North Atlantic. *Journal of Marine Research* 34, 131-140.
- Wu, J. (1969). Froude Number Scaling of Wind-Stress coefficients. *Journal of the Atmospheric Sciences* 26, 408-413.
- Wu, J. (1980). Wind-Stress Coefficients over Sea Surface near Neutral Conditions. *Journal of Physical Oceanography* 727-740.
- Zajczkowski, U. (2009). Dinámica Lagrangiana del Atlántico Sur. Tesis Doctoral. Universidad de Buenos Aires.
- Zenk, W., Finke, M., Müller, T.J. and Llinás, O. (1986). The role of the Canary current in the subtropical Atlantic gyre circulation. Joint meeting of the European Geophysical Society and the European Seismological Commission 6, 375.
- Zhou, M., Paduan, J.D. and Niiler, P.P. (2000). Surface currents in the Canary Basin from drifters observations. *Journal of Geophysical Research* 105(C9), 21,893-21,911.
- Zielinski, O., Llinás, O., Oschlies, A. and Reuter, R. (2002). Underwater light field and its effect on a one-dimensional ecosystem model at station ESTOC, north of the Canary Islands. *Deep-Sea Research II* 49, 3529-3542.

9. ANEXO-PUBLICACIONES

9. ANEXO DE PUBLICACIONES

- Cardona, L., Cianca, A., Martín, J., Pérez-Marrero, J., Villagarcía, M.G. and Llinás, O. (2009). Wavelet analysis to detect circulation patterns in drifter trajectories deployed in the Canary Current. *Geophysical Research Abstracts* 11, EGU2009-11604-1.
- Cardona, L., Cianca, A., Martín, J.M., Pérez-Marrero, J., Villagarcía, M.G., Rueda, M.J. and Llinás, O. (2009). Análisis Wavelet para detectar pautas de circulación en las trayectorias de las boyas de deriva. *Simposio de Física de la Atmósfera y Oceanografía*. 318-319. ISBN: 978-84-692-4956-7.
- Cardona, L., González, J.A., Ortiz, V.M., Gelado, M.D., Rueda, M.J. and Llinás, O. (2011). Surface Current in the Macaronesian Region, Thirteen years of Drifting data. *MARTECH*, 2011. *Instrumentation View point* 11, p27.
- Cardona, L., Pérez-Marrero, J., Maroto, L., Barrera, C., Rueda, M.J. and Llinás, O. (2007). Corriente Superficial en la Región del Archipiélago Canario, medida por boyas de deriva y datos de altímetro. *Teledetección. Herramienta para la gestión sostenible*. ISBN: 978-987-543-127-0.
- Cardona, L., Villagarcía, M., Cianca, A., Barrera, C., Vega-Moreno, D., Rueda, M.J. and Llinás, O. (2014). Measuring surface currents in the Canary Region with Fifteen years of drifting buoy data. *7th EuroGOOS Conference*. Submitted for approval.
- Cardona, L., Villagarcía, M., Pérez-Marrero, J., Santana, R., Cianca, A., Barrera, C., Llerandi, C., Vega-Moreno, D., Rueda, M.J. and Llinás, O. (2011). Thirteen years of drifting data. Surface currents in the Canary Islands region. *OCEANS, 2011 IEEE*. 1-3. doi: 10.1109/Oceans-Spain.2011.6003607
- García Weill, L., Suárez, D., Cardona, L., Barrera, C., Maroto, L., Pérez, J., Tejera, A., Llinás, O. and Iribar, M. (2007). Análisis de fenómenos mesoescalares en la región canaria utilizando datos de teledetección y boyas a la deriva. *Teledetección. Herramienta para la gestión sostenible*. ISBN: 978-987-543-127-0.

- Llerandi, C. Barrera, C., Gelado, M.D., Cardona, L., Villagarcía, M., Rueda, M.J., Vega, D. and Llinás, O. (2011). Early detection of hydrocarbons in the marine environment. IEEE Proceeding Oceans'11. doi: 10.1109/Oceans-Spain.2011.6003624.
- Maroto, L., Pérez-Marrero, J., Rueda, M.J., Cardona, L., Villagarcía, M.J., Godoy, J. and Llinás, O. (2005). Análisis mesoesalar de datos oceanográficos a través de productos satelitales mejorados. Teledetección, Avances en la Observación de la Tierra 203-206. ISBN: 84-609-6894-4.
- Pérez-Marrero, J., Cardona, L., Amat-García, J.M., Marcos-Delgado, V. and Llinás, O. (2009). Predicción Operacional de las trayectorias de objetos a la deriva en el mar. I Jornadas Nacionales de Seguridad y Contaminación Marina. ISBN: 978-84-692-3529-4.
- Pérez-Marrero, J., Llinás, O., Maroto, L., Cardona, L., Rueda, M.J., Barrera, C. and Villagarcía, M.G. (2005). Una herramienta para a fusión de datos oceanográficos obtenidos mediante satélite. Teledetección, Avances en la Observación de la Tierra, 167-170. ISBN: 84-609-6894-4.
- Pérez-Marrero, J., Maroto-Goikoetxea, L., Rueda, M.J., Villagarcía, M., Godoy, J., Cianca, A., Barrera, C., Cardona, L. and Llinás, O. (2003). Estudio por Teledetección de las entradas de polvo sahariano al océano y su posible influencia sobre la productividad marina en el área macaronésica. Encuentro sobre Meteorología y Atmósfera de Canarias, 33. ISBN: 8483202514, 9788483202517.
- Pérez-Vallazza, C., Álvarez-Vázquez, R., Cardona, L., Pintado, C. and Hernández-Brito, J.J. (2008). Cetacean diversity at the west coast of La Palma Island (Canary Islands). Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom 88(6), 1289-1296.
- Vega-Moreno, D., Llerandi, C., Cianca, A., Cardona, L., Villagarcía, M., Santana, R., Rueda, M.J. and Llinás, O. (2011). Variability of phytoplankton communities in central East Atlantic(ESTOC). IEEE Proceeding Oceans'11. doi:10.1109/Oceans-Spain.2011.6003478.

Presentaciones en Congresos:

Cardona, L., Villagarcía, M.G., Pérez-Marrero, J., Maroto, L., Godoy, J., Barrera, C., González-Roncero, E., Rueda, M.J. and Llinás, O. (2005). A semi-empirical Lagrangian model for search and rescue services in the Canary Islands archipelago. LAPCOD Meeting, Lerici, Italy.

<http://www.rsmas.miami.edu/LAPCOD/2005-Lerici/abstracts/absC401.html>

Pérez-Marrero, J., Cardona, L., Martín, J.M., Maroto, L., Vega-Moreno, D., Rueda, M.J. and Llinás, O. (2009). Investigation on the relationship between Saharan aerosols deposition and phytoplankton abundance in the central North Atlantic. SOLAS Conference, Barcelona.

<http://c666895.r95.cf2.rackcdn.com/hidden/compiledabstr/PosterAbstracts041109.pdf>

Santana, R., Cianca, A., Villagarcía, M.G., Pérez-Marrero, J., Cardona, L., Rueda, M.J. and Llinás, O. (2009). ESTOC: 15 years of biogeochemical observations at the eastern north subtropical gyre. SOLAS Conference, Barcelona.

<http://c666895.r95.cf2.rackcdn.com/hidden/compiledabstr/PosterAbstracts041109.pdf>

Santana, R., Cianca, A., Villagarcía, M., Cardona, L., Pérez-Marrero, J., Llerandi, C., Rueda, M.J. and Llinás, O. (2010). Interannual Variability of Nutrient Fluxes in the Eastern North Atlantic. Ocean Sciences Meeting, Portland, USA.

<http://www.agu.org/meetings/os10/>

Barrera, C., Rueda, M.J., Morán, R., Santana, R., Lorenzo, A., Vega, D., Cardona, L., Manzanos, A. and Llinás, O. (2012). ESTOC SITE: Improving its permanent time-series ocean observing program with underwater gliders. Ocean Sciences Meeting, Utah, USA.

<https://www.sgmeet.com/osm2012/viewabstract2.asp?AbstractID=11233>

Delory, E., Villagarcía, M., Barrera, B., Vega, D., Cardona, L., Gelado, M.D., Cianca, A., Rueda, M.J. and Llinás, O. (2013). The ESTOC station: an infrastructure for the continuous monitoring of open-ocean variables, including acidification. EUR-OCEANS Hot Topic Conference. A changing Ocean, Spain.

http://www.eur-oceans.eu/sites/default/files/activities/2013/30488/EOC_2013_conference_booklet_web.pdf